
NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06637556 3







LEHRBUCH

DER

ELEKTROTECHNIK.

ZUM GEBRAUCHE BEIM
UNTERRICHT UND ZUM SELBSTSTUDIUM

BEARBEITET

VON

EMIL STÖCKHARDT,
DIPLOM-INGENIEUR UND KÖNIGL. OBERLEHRER.

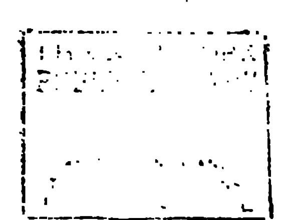
MIT MEHREREN HUNDERT FIGUREN

ZWEITE, UMGEARBEITETE UND ERWEITERTE AUFLAGE.





LEIPZIG
VERLAG VON VEIT & COMP.
1908



Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Vorwort.

Die vorliegende zweite Auflage soll eine Grundlehre der Elektrotechnik für die Auffassung und die Bedürfnisse derjenigen geben, die dem allgemeinen Maschinenwesen nahestehen. Sie hält den Grundsatz aufrecht, unter Vermeidung höherer Mathematik in den Entwicklungen weit auszuholen, Zusammenhänge mit der übrigen Technik in reichem Maße zu benutzen und die Gegenstände nach Möglichkeit mehr einleuchtend zu machen, als streng zu rechnen.

Gegen die erste Auflage ist der Vorsatz insofern geändert, als das Lehrbuch nicht für bestimmte Lehranstalten zugeschnitten sein soll, und es konnte daher in den Entwicklungen stellenweise weiter gegangen werden. Somit ist der Verwendung zum Selbststudium auch für höhere Anforderungen entgegengekommen, ohne daß der Hauptzweck, die Unterstützung des Lehrvortrages, aus dem Auge gelassen wurde.

Die meisten Gegenstände des Lehrbuches sind aus Anfängen entwickelt, und so schien es auch in verschiedenen Kapiteln, wo der logische Aufbau nicht darunter litt, ratsam, die Reihenfolge der historischen Entwicklung zu begünstigen. Das Lehrbuch will das Verständnis der modernen Technik mit Betonung praktischer Fragen dem Anfänger vorbereiten und das Eindringen in Spezialgebiete erleichtern. Besonders eingehend behandelt sind diejenigen praktischen Fragen, die bei den zumeist vorkommenden elektrischen Anlagen in bezug auf Verständnis und Bedienung in Betracht kommen.

Im besonderen ist gegen die erste Auflage folgendes hervorzuheben: Die einfachsten Tatsachen der Schwachstromtechnik sind knapp erwähnt. Die Rechenbeispiele sind vermehrt und über das ganze Gebiet verteilt. Die Leitungen sind ausführlicher behandelt. Die Lehre vom Magnetismus und von der Induktionselektrizität ist erweitert unter Hinzuziehung des dreidimensionalen absoluten Maßsystemes. Rechnungen an elektrischen Gleichstrommaschinen, die nur zur Erläuterung der Vorgänge dienen sollen, sind auch auf Gleichstrommotoren ausgedehnt worden. Neu ist außerdem das Gebiet, das die Anwendung der Akkumulatoren

im Zentralenbetriebe behandelt, sowie ein Kapitel über Gleichstromzentralen überhaupt. Schließlich sind die Gesetze des Wechselstromes und des Transformators ausführlicher gebracht. In dem Anhang „Wissenschaftliche Ergänzungen" sind einige aus dem Rahmen des Lehrbuches herausfallende Bemerkungen gesammelt.

Sachlich sei noch bemerkt: Die Fig. 279 gilt symbolisch. Tatsächlich lenkt der Strom der in sich kurzgeschlossenen Ankerspulen das Feld der Wendepole periodisch ab. Fig. 454 ist gebracht, weil diese Schaltungsweise in Verbindung mit zwangläufigen Schaltern (z. B. D.R.P. Nr. 140689) eine gute Lösung der Bogenlampenfrage darstellt, ohne daß diese Schaltung weiteren Kreisen genügend bekannt ist.

Elberfeld, den 12. April 1908.

E. Stöckhardt.

Inhalt.

1. Kapitel.

Von der mechanischen Arbeit.

2. Kapitel.

Die Wirkungen von Elektrizitätsmengen aufeinander.

3. Kapitel.

Die Wirkungen der strömenden Elektrizität.

4. Kapitel.

Übersicht über die Anwendungen des elektrischen Stromes.

5. Kapitel.

Die Gesetze des elektrischen Gleichstromes.

6. Kapitel.

Leitungen und Zubehör.

7. Kapitel.

Die elektrische Beleuchtung.

I. Die Glühlampen.

II. Die Bogenlampen.

III. Messungen an Lichtquellen.

8. Kapitel.

Magnetismus, Elektromagnetismus und Induktionserscheinungen.

9. Kapitel.

Die Gleichstromerzeuger.

10. Kapitel.

Die Gleichstrommotoren.

Seite

11. Kapitel.

Die Meßgeräte.

12. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

13. Kapitel.

Gleichstromzentralen.

14. Kapitel.

Der Wechselstrom.

1. Kapitel.

Von der mechanischen Arbeit.

§ 1. Kraft und Weg.

Wird ein Stein gehoben, so legt die hebende Kraft einen Weg gegen die Wirkung der Schwerkraft zurück.

Damit ein Stein auf dem Erdboden fortgerückt wird, ist gegen den Stein in Richtung der Bewegung eine Kraft auszuüben. Im Sinne dieser Bewegung legt der Stein einen Weg zurück.

Bei dem Abdrehen eines Eisenkörpers greift ein Drehstahl mit seiner Schneide in das Material ein; damit der Span abgeschnitten wird, ist eine Kraft anzuwenden; das Werkstück legt bei seiner Drehung unter dem Einfluß dieser Kraft einen Weg zurück.

Bei jeder Bewegung, die in einem Betrieb auszuführen ist, sind widerstehende Kräfte zu überwinden.

§ 2. Die mechanische Arbeit.

Multipliziert man die Kraft, die entlang eines Weges überwunden wird, mit dem Weg, so entsteht ein Wert

$$Kraft \times Weg;$$

ein solcher Wert wird bezeichnet mit dem Ausdruck *Arbeit* (*Energie*) [Hist. 3].

Drückt man die Kraft P aus in Kilogramm (kg) und den unter der Kraftwirkung zurückgelegten Weg w in Meter (m), so erhält man die Arbeit A in Meterkilogramm (mkg).

$$A = P \cdot w.$$

Soll eine Last senkrecht gehoben werden, so ist die bei der Bewegung zu überwindende senkrechte Kraft gleich dem Gewicht der Last. Zur Ermittlung der Arbeit ist daher das Gewicht des zu hebenden Körpers mit dem Höhenunterschied zwischen Anfangs- und Endstellung zu multiplizieren.

Bei dem Schleifen einer Last auf wagerechtem Boden kommt eine seitlich aufzuwendende Kraft in Frage. Hier ist die erforderliche Arbeit

um so größer, je größer diese seitliche Kraft und je größer der Weg ist (Reibungsarbeit).

Wird die Last auf wagerechtem Boden gefahren, so ist die erforderliche Arbeit geringer als beim Schleifen der Last, weil der Weg des Zapfens im Lager kürzer ist, als der Weg der Last, und weil durch Anwendung glatter Lagerflächen und geeigneter Schmiermittel die widerstehende Kraft im Lager verringert wird.

1. Beispiel. Ein Stein soll 30 kg wiegen und 12 m senkrecht gehoben werden. Wie groß ist die erforderliche Arbeit?

Die erforderliche Arbeit beträgt:

$$12_{m} \cdot 30_{kg} = 360 \text{ mkg}.$$

2. Beispiel. Wieviel mkg sind zu leisten, wenn ein Stein auf wagerechtem Erdboden 10 m weit geschleift werden soll, während die Kraft, welche seitlich gegen den Stein auszuüben ist, 15 kg beträgt?

Die Arbeit beläuft sich auf:

$$10_{m} \cdot 15_{kg} = 150 \text{ mkg}.$$

Unter Berücksichtigung der Zerlegung von Kraft und Weg gilt allgemein:

Arbeit = (*Weg*) × (*Kraftkomponente in Richtung des Weges*)

oder, was dasselbe ergibt:

Arbeit = (*Kraft*) × (*Wegkomponente in Richtung der Kraft*).

§ 3. Arbeit und Gegenarbeit.

Eine mechanische Arbeit, die zu leisten ist, kann nur durch eine mechanische Arbeit von einer Betriebsquelle her geleistet werden. Diese beiden zusammengehörigen Arbeiten werden unterschieden als Arbeit und Gegenarbeit; sie sind gleich groß, aber einander entgegengesetzt gerichtet. Die Summe von Arbeit (positiv) und Gegenarbeit (negativ) ist gleich Null.

Es kann für die Natur keine Arbeit verloren gehen und keine Arbeit erzeugt werden (Satz von der Erhaltung der Arbeit)[Hist. 31]).

Einzelfälle. Die Schwerkraft einer Last wirkt von oben nach unten. Ein Arbeiter, der diese Last hebt, äußert eine Kraft von unten nach oben. Die Muskeln als Betriebsquelle leisten die Arbeit; die Last nimmt die Arbeit auf.

Eine gehobene Last kann durch die Schwerkraft sinken und dadurch eine andere Last heben. Nun ist die sinkende Last Betriebsquelle, sie leistet Arbeit, während die aufwärtsgehende Last die Arbeit aufnimmt.

1. Beispiel. Die Arbeit am Hebel. An einem Hebel ist Gleichgewicht, wenn mit den Bezeichnungen von Fig. 1 die beiden Kräfte P_1 und P_2 sich umgekehrt verhalten, wie die Hebelarme l_1 und l_2:

$$P_1 : P_2 = l_2 : l_1 \quad \text{oder} \quad P_1 l_1 = P_2 l_2 .$$

Wird der Hebel um ein kleines Stück gedreht, etwa bis in die gestrichelte Lage, so ist der Weg w_1 der größeren Last in demselben Maße kleiner, als der Weg w_2 der kleineren Last, wie P_2 kleiner als P_1 ist:

$$w_1 : w_2 = P_2 : P_1 \text{ oder } P_1\,w_1 = P_2\,w_2;$$

also es folgt hieraus die Gleichheit von Arbeit und Gegenarbeit.

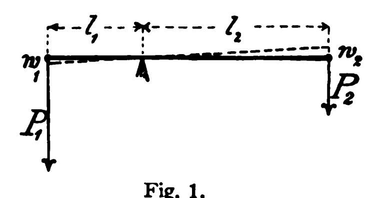


Fig. 1.
Kräfte und Wege am Hebel.

Wird die Richtung von oben nach unten für Kräfte und Wege durch positives Vorzeichen ausgedrückt, während die umgekehrte Richtung mit negativem Vorzeichen angedeutet sei, so steht bei dem Heben der Last P_1 vor dem Ausdruck $P_1\,w_1$ das Minuszeichen, während die Arbeit $P_2\,w_2$ positiv ist.

2. Beispiel. Die Arbeit an der schiefen Ebene. An einer schiefen Ebene (Fig. 2), durch die eine Last P um den senkrechten Weg w gehoben werden soll, ist in Richtung der schiefen Ebene, die mit der wagerechten den Winkel α bildet, eine Kraft P_1 vorhanden:

$$P_1 = P \cdot \sin\alpha\,.$$

Die P_1 gleiche Gegenkraft P_1' multipliziert mit dem gesamten Weg w_1 in Richtung der schiefen Ebene bildet die zu leistende Arbeit. Es gilt außerdem:

$$w = w_1 \cdot \sin\alpha \quad \text{oder} \quad w_1 = \frac{w}{\sin\alpha}\,.$$

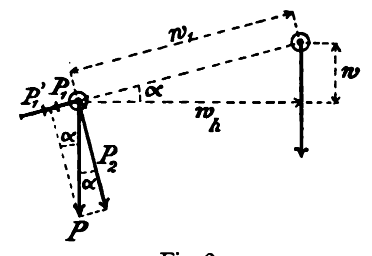


Fig. 2.
Kräfte und Wege an der schiefen Ebene.

Die zu leistende Arbeit beträgt demnach:

$$A = P_1 \cdot w_1 = P \cdot \sin\alpha \cdot \frac{w}{\sin\alpha} = P \cdot w\,;$$

also auch hier ist die Arbeit gleich der Gegenarbeit. Ist P_1' negativ ($\uparrow$) und w_1 negativ ($\uparrow$), ist ferner P positiv ($\downarrow$) und w negativ ($\uparrow$), so wird unter Berücksichtigung der Vorzeichen:

$$+ P_1'\,w_1 - P \cdot w = 0\,.$$

§ 4. Die Formen der Arbeit.

1. Arbeitsvermögen der Lage (potentielle Energie).

Jeder Körper, der sich in einer Höhenlage befindet, aus der er sich durch eigene Schwere herabbewegen kann, enthält eine Arbeitsmenge in sich aufgespeichert. Diese Arbeitsmenge A (in mkg) ist gleich

dem Produkt aus dem Gewicht P (in kg) des Körpers und dem senkrecht gemessenen Abstande h (in m) zwischen Ausgangs- und Endhöhenlage*:

$$A = P \cdot h.$$

Falls die Bewegung eines Körpers von einer geringeren zu einer größeren Höhenlage reibungslos vor sich geht, ist der Körper imstande, bei ebenfalls reibungsloser Abwärtsbewegung zu der Höhenlage seines Ausgangspunktes dieselbe Arbeit wieder abzugeben, die er vorher aufgenommen hatte. Dabei ist die Bahn des Körpers im ersten Fall, wie im zweiten, ganz beliebig, da für jedes Wegteilchen der Neigungswinkel, wie § 3 gelehrt hat, sich forthebt.

Einzelfälle. Das Wasser, das in den Bergen zu Boden fällt, bewegt sich von dort zum Meeresspiegel. Teile dieser Fallhöhe können wir durch Wasserräder, Turbinen und andere Motoren zur Ausnutzung der im Wasser enthaltenen Arbeit heranziehen.

Ein Steinbruch an einem Berge bedarf zur Beförderung seiner Erzeugnisse in die Ebene keiner Betriebsmaschine, falls volle Wagen gesenkt und leere gehoben werden (Drahtseilbahnen).

2. Lebendige Arbeit (kinetische Energie).

Jeder mit Gewicht begabte Körper enthält durch einen Geschwindigkeitszustand einen Vorrat von mechanischer Arbeit in sich, die er abgibt, wenn seine Geschwindigkeit sich verringert. Ein Körper, der seine Geschwindigkeit vergrößert, nimmt Arbeit auf.

Ändert eine Masse m (Masse = Gewicht in kg dividiert durch Erdbeschleunigung in m/Sek.²) ihre Geschwindigkeit (in m/Sek.) zwischen den Werten v_1 und v_2, so ist die dabei auftretende Arbeit (in mkg):

$$A = \frac{m \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2}.$$

Einzelfälle. Läßt man einen zuvor gehobenen Körper frei fallen, so nimmt er immer größere Geschwindigkeit an. Wo er auftrifft, übt er Kräfte aus, gegen die ein Weg zurückgelegt wird, wobei der Körper

* Dieser Satz bezieht sich auf einen besonderen Fall der Gravitationsarbeit. Die von Newton Hist. 5) entdeckte Gravitationskraft, mit der sich zwei Massen m_1 und m_2 im Abstande r gegenseitig anziehen, ist:

$$P = c \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

wobei c eine vom Maßsystem abhängige Konstante bedeutet. Nähern sich die beiden Massen einander, so wird Arbeit geleistet, wobei aber mit geringer werdendem Abstand die Kraft P wächst. Die Arbeit entlang eines bestimmten Weges setzt sich dann zusammen aus einer großen Summe einander verschiedener Arbeiten auf den einzelnen Wegeteilchen.

Bei der Erde kann für uns die Schwerkraft eines Körpers deshalb konstant angenommen werden, weil die Schwerpunktsabstände der Erde und des zu hebenden Körpers sich bei den für uns in Frage kommenden Höhen nur in sehr geringem Maße verändern.

seine Geschwindigkeit einbüßt. Beispiele für die Ausnutzung der durch die Schwere erteilten kinetischen Energie bilden Fallhämmer und Rammen. Ein Beispiel für die Arbeitsausnutzung der durch Muskelkräfte beschleunigten Massen gibt der Handhammer: er wird auf einem längeren Wege, dem Wege des Schwunges, beschleunigt, nimmt dabei Arbeit auf und gibt sie da, wo er auftrifft, meistens auf einem kürzeren Wege, etwa wie beim Abschroten eines Metallstückes, wieder ab.

Ein Schwungrad wird beschleunigt, wenn die treibenden Kräfte größer sind, als die abgenommenen, verzögert, wenn die abgenommenen Kräfte größer sind, als die treibenden. Bei wechselnden Kräften nimmt es Arbeit auf und gibt Arbeit ab, stets unter Änderung seiner Geschwindigkeit.

3. Arbeit bei Temperaturänderung.

Jeder Körper, der gegen einen zweiten eine höhere Temperatur besitzt, enthält dadurch einen Arbeitsvorrat in sich aufgespeichert. Er gibt Arbeit ab, indem er sich abkühlt.

Nennen wir die Wärmemenge, die 1 l Wasser in der Temperatur um 1 Grad ändert, eine Kalorie, so ist die bei der Änderung von der Ausgangstemperatur bis zur Endtemperatur auftretende Arbeit (in mkg) gleich dem Produkt aus der Anzahl der auftretenden Kalorien und der Zahl 424 (Wärmeäquivalent [Hist. 32]) der mechanischen Arbeit: 1 Kalorie = 424 mkg). Ändert ein Körper vom Gewicht P (in kg) und der spezifischen Wärme σ seine Temperatur von dem höheren Werte τ_2 zu dem niederen Werte τ_1 (in Celsiusgraden), so ist die dabei abgegebene Arbeit A (in mkg):

$$A = P \cdot \sigma (\tau_2 - \tau_1) \cdot 424 .$$

Einzelfälle. Ist die Auf- und Abbewegung eines unter dem Einfluß der Schwerkraft stehenden Körpers mit Reibung verbunden, so muß zum Heben eine größere Kraft, als das Gewicht des Körpers, angewendet werden. Bei dem Senken kann nur eine kleinere Kraft, als das Gewicht des Körpers, ausgenutzt werden. Bewegen wir den der Reibung unterliegenden Körper erst aufwärts und dann abwärts zu seinem Ausgangspunkt zurück, so fehlt scheinbar zwischen dem aufgewendeten und dem abgegebenen Betrag der Arbeit ein Teil, als ob das Gesetz von der Erhaltung der Arbeit nicht richtig wäre. Man bemerkt aber bei der gegenseitigen Reibung von Körpern eine Wärmeentwicklung. Reibt man kräftig Holz auf Holz, so kann es sich entzünden. Reibt ein Lager infolge schlechter Schmierung mehr als sonst, so wird es deutlicher warm. Ein Werkstück erhitzt sich unter der Feile. Für den durch Reibung scheinbar verlorenen Betrag an mechanischer Arbeit haben wir eine höhere Temperatur des Körpers und damit eine Wärmemenge bekommen, die der für sie aufgewendeten mechanischen Arbeit gleichwertig ist.

Die durch Reibung in Wärme umgesetzte mechanische Arbeit wird in vielen Fällen als Arbeitsverlust gerechnet, wo sie in Anbetracht

des Zweckes der Betriebseinrichtung (z. B. bei dem Lager der Transmission) nicht rückgewinnbar ist.

Die Arbeit in Form von Wärme, die bei Temperaturänderung eines Körpers auftritt, kann dagegen auch ausnützbar sein:

Saugt man in einen Zylinder mit Hilfe eines Kolbens heiße Luft, und schließt man sie ab, so zieht sie sich bei der Abkühlung zusammen und übt dadurch eine Kraft auf den Kolben aus, der entlang des Kolbenweges Arbeit leistet.

4. Arbeit der latenten Wärme.

Ein Körper, der imstande ist, eine Aggregatszustandsänderung durchzumachen, vollzieht diese Änderung mit einem Arbeitsvorgang. Der Körper im höheren Aggregatszustand besitzt gegen den Körper im niederen Aggregatszustand aufgespeicherte Arbeit in sich. Diese Arbeit (in mkg) wird wiederum erhalten durch Multiplikation der bei der Änderung auftretenden Kalorienzahl mit 424.

Erläuterung. Es kommt vor, daß wir einem Körper Wärme zuführen, ohne daß sich seine Temperatur ändert. Das ist der Fall, wenn der Körper bei der Wärmezufuhr vom festen in den flüssigen, oder von dem flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht (Schmelzwärme und Verdampfungswärme). So braucht beispielsweise:

1 kg Eis	von 0°	zur Überführ.	in 1 kg Wasser	von 0°	etwa 80	Kal.
1 „ Wasser	„ 100°	„ „	„ 1 „ Dampf	„ 100°	„ 537	„
1 „ festes Quecks.	„ −40°	„ „	„ 1 „ flüss. Quecks.	„ −40°	„ 2,82	„
1 „ flüss. „	„ 350°	„ „	„ 1 „ gasf. „	„ 350°	„ 62	„
1 „ festes Silber	„ 999°	„ „	„ 1 „ flüss. Silber	„ 999°	„ 21,07	„

Ebenso gibt ein Körper, der von einem höheren zu einem niederen Aggregatszustand übergeht, Wärmemengen ab (Erstarrungswärme und Kondenswärme). Alle Erfahrungen deuten darauf hin, daß hierbei für einen bestimmten Körper dieselben Kalorienzahlen auftreten, wie beim umgekehrten Vorgang. Durch das Auftreten von Wärmemengen tritt nach Angabe des vorigen Absatzes zugleich eine Arbeitsmenge auf, und so ist obiger Lehrsatz berechtigt.

Einzelfall. Der Kondensator einer Dampfmaschine nimmt abgespannten Dampf auf, schließt ihn ab und kühlt ihn. Dabei kondensiert der Dampf. Es entsteht im Kondensator Unterdruck (verdünnter Raum), und durch die Saugwirkung dieses Raumes gibt die im Dampf enthaltene Arbeit mit Hilfe von Zylinder und Kolben bei jedem Hub einen Wert Kraft mal Weg ab.

5. Arbeit der elastischen Formänderung.

Ein Körper kann nur mit Hilfe eines Arbeitsaufwandes zusammengedrückt oder gedehnt werden. Diese dem Körper zuzuführende Deformationsarbeit findet dabei ihre Gegenarbeit zum Teil in der unmittelbar zurückgewinnbaren Arbeit der elastischen Formänderung und zum Teil in Wärme.

Einzelfälle. Ein Gummistreifen, der vorher gespannt worden ist, nimmt beim Loslassen seine frühere Form wieder an. Bei der Rückbewegung kann er Kräfte entlang dieses Weges überwinden. Gleiches Verhalten zeigen viele Metalle; es beruht darauf die Anwendung der Federn. Der elastische Körper gibt die ihm vorher beim Spannen zugeführte Arbeit beim Entspannen wieder ab. Im gespannten Zustand enthält er einen Vorrat mechanischer Arbeit in sich aufgespeichert.

Stößt man eine Bleikugel auf einen harten Gegenstand, so bekommt sie eine bleibende eingedrückte Stelle. Es findet nach der Formänderung bei dem unelastischen Körper kein Zurückfedern statt, obgleich eine mechanische Arbeit zum Herstellen der Formänderung aufgewendet worden war. Hier setzt sich, ähnlich dem Vorgang unter Abschnitt 3, die Arbeit in Wärme um.

Bei dem elastischen festen Körper vergrößert sich die Kraft in dem gleichen Maße, wie der Weg der Formänderung vom entspannten Zustand aus gerechnet. Daher besteht die Arbeit für einen bestimmten Weg aus einer Summe von Einzelwerten (Kraft) × (Weg), die voneinander bei gleichen Wegteilchen verschieden sind und zwar nach dem Gesetz einer geraden Linie, die durch den Punkt der Entspannung hindurchgeht. Ist ein fester Körper bis zur Kraft P (in kg) auf dem Wege w (in m) vom entspannten Zustand aus elastisch gespannt, so enthält er demnach die Arbeit A (in mkg):

$$A = \frac{P \cdot w}{2}.$$

Eine besondere Stellung unter den elastischen Körpern nehmen die Gase ein, denen eine hochgradige Elastizität zukommt. Sie erwärmen sich bei der Kompression und kühlen sich ab bei der Expansion. Ein Gasvolumen, das erst komprimiert wird, und dann expandiert, verbraucht bei der Expansion die ganze Kompressionswärme wieder, um zu dem Ausgangszustand zurückzugelangen. Also hier ist auch der Wärmeanteil der Formänderungsarbeit für einen Betrieb nicht verloren.

Eine Anwendung der Elastizität zur Arbeitsaufspeicherung im großen Maßstabe liegt bei dem Dampfkessel vor. Der Dampf wird durch Einwirkung der Wärme in dem Dampfkessel erzeugt, wo er sich zugleich spannt. Seine elastische Formänderung mit gleichzeitiger Wärmeabgabe geht im Zylinder der Dampfmaschine vor sich, in dem die im gespannten Dampf enthaltene Arbeit vermöge des Kolbens in einen Wert (Kraft) × (Weg) umgewandelt wird.

6. Chemische Energie.

Stoffe, die miteinander eine chemische Verbindung eingehen können, vollziehen diese Verbindung mit einem Arbeitsvorgang, wobei entweder Arbeit frei (ausnutzbar oder abgegeben) wird, oder wobei Arbeit aufgewendet (zugeführt, aufgenommen oder absorbiert) wird. Die aus-

nutzbare Arbeit ist in den Verbrauchsmaterialien vor dem Zustandekommen der Verbindung enthalten.

Einzelfälle. Man muß bei manchen chemischen Vorgängen zum Zustandekommen einer Verbindung Wärmemengen zuführen (endothermische Verbindungen). Beim Zustandekommen anderer Verbindungen wird Wärme frei (exothermische Verbindungen). So z. B. entwickeln sich bei der Verbindung eines Gemisches (Knallgas) von 2 g Wasserstoff mit 15,96 g Sauerstoff zu 17,96 g Wasserdampf 58 Kalorien. Ebenso nehmen 17,96 g Knallgas bei ihrer Herstellung aus Wasser 58 Kalorien auf. Diese Wärmemenge ist an dem fertigen Produkt ohne weiteres nicht wahrnehmbar, sondern sie tritt nur bei der Stoffänderung auf. Da die Wärmemenge aber bei dem Überführen von Knallgas in Wasser der Zahl nach dieselbe ist, wie bei dem umgekehrten Vorgang, können wir sagen, in 17,96 g Knallgas sei die Wärmemenge von 58 Kalorien und somit der ihr entsprechende Arbeitsvorrat von 424 · 58 mkg oder rund 24600 mkg gegenüber dem Wasser enthalten.

Die Kohle verbrennt mit dem Sauerstoff der Luft zu Kohlendioxyd. Kohle und Sauerstoff zusammen wiegen im luftleeren Raume vor der Verbrennung ebensoviel wie das Kohlendioxydgas nach der Verbrennung. Ein Verlust an Stoff ist nicht eingetreten [Hist. 11]), aber es werden auf 1 kg Kohlen, denen der nötige Sauerstoff zugeführt wird, bei diesem Vorgang ungefähr 8000 Kalorien oder 424 · 8000 mkg (rund 3,4 Millionen mkg) frei. Einen Teil der im Brennmaterial enthaltenen Arbeit kann die Technik durch Dampfkessel und Dampfmaschine ausnützen.

Genauere Angaben über die Wärmemengen, die bei der Verbrennung des Kohlenstoffes und bei einigen anderen Verbindungen auftreten, gibt die nebenstehende Tabelle, zu der zu bemerken ist, daß auch bei der Lösung der Substanzen in Wasser ebenfalls Wärmemengen auftreten, die in der Tabelle berücksichtigt sind. Der umgekehrte Vorgang gibt an der Wärmetönung das umgekehrte Vorzeichen.

7. Mechanische Energie der Lebewesen.

Der Lebensprozeß ist bei Pflanzen und Tieren stets mit dem Auftreten mechanischer Arbeit verbunden. Indem z. B. Pflanzen wachsen, transportieren sie oft beträchtliche Gewichte (Baumstämme) der Schwere entgegen. Mensch und Tier leistet Arbeit mit seiner Muskelkraft und durch die stetige Entwicklung von Wärme. Das Auftreten der mechanischen Arbeit bei den Organismen läßt sich nicht ohne weiteres nach den Gesetzen der Naturwissenschaften behandeln und auch nicht rechnerisch verfolgen, es spielen sich aber bei dieser Arbeit Erscheinungen ab, die an die vorher behandelten Vorgänge erinnern.*

* Außer den hier aufgeführten Formen der mechanischen Arbeit kommt im späteren Verlauf noch die Arbeit bei elektrischen und magnetischen Änderungen in Betracht. Die hier aufgezählten Arbeitsformen erschöpfen nicht die vorhandenen, sie sind für das Verständnis des vorliegenden Lehrstoffes nur als die wichtigsten anzusehen.

Wärmetönung einiger Verbindungen:

Nr.	Verbindung	Reaktion	Wärmetönung
1.	H_2, O; trock. Verbindung	2,02 g Wasserstoff + 15,96 g Sauerstoff = 17,98 g Wasser	+ 58 Kal. (ex.)
2.	H_2, O; Verb. unt. Wasser	2,02 g Wasserstoff + 15,96 g Sauerstoff (+ X Wass.) = 17,98 g Wasser (+ X Wass.)	+ 78 Kal. (ex.)
3.	H, J; trockene Verbindung	1,01 g Wasserstoff + 126,54 g Jod = 127,55 g Jodwasserst.	− 6 Kal. (end.)
4.	N, H_3; trock. Verbindung	3,03 g Wasserstoff + 14,01 g Stickstoff = 17,04 g Ammoniak	+ 11,8 Kal. (ex.)
5.	NH_3; gelöst in Wasser	17,04 g Ammoniak (+ X Wasser) = (X + 17,04) g Salmiakgeist	+ 8,8 Kal. (ex.)
6.	NH_3; Verb. unter Wasser	3,03 g Wasserstoff + 14,01 g Stickstoff (+ X Wass.) = (X + 17,04) g Salmiakgeist	+ 20,6 Kal. (ex.)
7.	C, O; trockene Verbindung	11,97 g Kohlenstoff + 15,96 g Sauerstoff = 27,93 g Kohlenoxyd	+ 28,5 Kal. (ex.)
8.	CO, O; trock. Verbindung	27,93 g Kohlenoxyd + 15,96 g Sauerstoff = 43,89 g Kohlendioxyd	+ 68,4 Kal. (ex.)
9.	C, O_2; trockene Verbindung	11,97 g Kohlenstoff + 31,92 g Sauerstoff = 43,89 g Kohlendioxyd	+ 96,9 Kal. (ex.)
10.	Zn, O, SO_3; Verb. unt. Wass.	65,4 g Zink + 15,96 g Sauerst. + 79,86 g Schwefeltrioxyd (+ X Wasser) = 161,22 g Zinksulfat (+ X Wass.)	+ 106,1 Kal. (ex.)
11.	Cu, O, SO_3; Verb. unt. Wass.	63,3 g Kupfer + 15,96 g Sauerst. + 79,86 g Schwefeltrioxyd (+ X Wasser) = 159,12 g Kupfersulfat (+ X Wass.)	+ 56 Kal. (ex.)

§ 5. Der Austausch zwischen den einzelnen Arbeitsformen.

Es ist allgemein an den in § 4 behandelten Formen der mechanischen Arbeit wahrzunehmen, daß in allen Fällen, wo Arbeit auftritt, Zustandsänderungen (einschließlich der chemischen Zustände) auftreten, d. h. ohne diese Änderungen (der Höhenlage, der Geschwindigkeit, der Temperatur usw.) steht keine Arbeit in der Natur zur Verfügung und jede ausgeübte Arbeit erzeugt eine oder mehrere dieser Änderungen.

In der Natur herrscht das Bestreben, alle vorhandenen Energiemengen auszugleichen: Die Gebirge verwittern, an ihre Stelle treten Ebenen. Wasser, das auf die Berge fällt, fließt zum Meere. Bewegte Körper büßen durch gegenseitige Reibung ihren Bewegungszustand ein und kommen schließlich zum Stillstand. Wo höhere Temperatur an einer Stelle gegen die Umgebung vorhanden ist, gleichen die Körper ihre Temperaturen zu einer Zwischentemperatur aus. Besitzt ein Körper einen anderen Aggregatszustand als seine stofflich gleiche Umgebung (Bsp. Dampf in Wasser, Eis in Wasser), so vollzieht sich ebenfalls der Ausgleich der Aggregatszustände durch den Wärmeaustausch. Körper im Zustand verschiedener elastischer Spannung (Bsp. Luftdruck, Entstehung der Winde) gleichen ihre Verschiedenheiten aus. Chemische Verbindungen entstehen, wenn Arbeit bei dem Zustandekommen der Verbindung frei wird, und zwar um so leichter, je mehr Arbeit dabei frei wird.

Bei diesem großen Ausgleich der Energie ist nun zu beachten, daß mit dem Zerfall der einen Energieform wieder Energiemengen, und zwar für unsere Begriffe stets gleichwertige Energiemengen, neu auftreten: Potentielle Energie erzeugt kinetische, wenn erstere aufgegeben wird, z. B. beim Abstürzen von Gesteinsmassen oder beim Fließen des Wassers. Wird Energie der Bewegung aufgegeben, so erzeugt sie z. B. durch Reibung Wärme, durch Anstauung wieder potentielle Energie oder bei elastischen Körpern elastische Spannung. Indem die Natur von ihrem vorhandenen Wärmevorrat (Sonne, Erdwärme) abgibt, läßt sie Wasserdampf (Wolkenbildung) entstehen, der das Wasser wieder auf die Berge trägt und für neue Energie sorgt, oder sie erzeugt chemische Vorgänge (Entstehung von Kohle, Petroleum), wobei die Ausnutzung der in diesen Materialien gebundenen Arbeit (Verbrennung mit Sauerstoff) in späteren Zeiten erfolgen kann.

Unter Berücksichtigung aller dieser Vorgänge gilt das in § 3 für einfachere Verhältnisse behandelte Gesetz von der Erhaltung der Arbeit. Auch hier ist die Arbeit stets gleich der Gegenarbeit, oder was dasselbe heißt:

Die durch irgend einen Vorgang auftretende (ursächliche) Arbeit ist gleich der Summe aller Arbeiten der erzeugten Wirkungen.

Bei diesem Austausch der Arbeitsformen, in dem die Energie Wege nach bestimmten Gesetzen geht, ist die Technik bestrebt, einen möglichst großen Teil der auftretenden Arbeit nutzbar anzuwenden. Alle

Arbeitsleistungen, die in den Betrieben vorkommen, und die mit Hilfe der Betriebsmaschinen (Windmühlen, Wasserräder, Turbinen, Dampfmaschinen, Gasmotoren usw.) gewonnen werden, entnehmen wir dem großen Arbeitsausgleich der Natur, indem wir die Arbeit in bestimmte vorgeschriebene Bahnen leiten. Das Material, das die Arbeit in sich aufgespeichert hat, heißt der Träger der Arbeit oder das motorische Mittel.

§ 6. Der Wirkungsgrad.

Unter dem Wirkungsgrad einer Einrichtung versteht man das Verhältnis der Nutzarbeit A_n des dabei auftretenden Vorganges zu der zugeführten Arbeit A_z; er ist eine unbenannte Zahl, ist stets kleiner als 1 und wird als Formelgröße meistens mit η bezeichnet:

$$\eta = \frac{A_n}{A_z}.$$

Erläuterung. Wie der vorige Paragraph gezeigt hat, tritt bei allen Vorgängen zu einer Arbeit stets eine Gegenarbeit auf, die sich meistens als Summe von Beträgen verschiedener Arbeitsformen darstellt. Die ursächliche Arbeit (in mkg) ist für die Natur stets gleichwertig der Summe der auftretenden Arbeiten (in mkg) der Wirkungen. Für einen Betrieb kommt es aber darauf an, einen vorhandenen Arbeitsvorrat in eine ganz bestimmte andere Arbeitsform umzusetzen oder eine ganz bestimmte nutzbringende Arbeit damit zu verrichten.

Man kann in einem Betrieb niemals alle vorhandene Arbeit in die nutzbringende Form umsetzen; ein Teil geht immer in andere Bahnen, indem Begleiterscheinungen beim Umsatz auftreten, die selbst Arbeit beanspruchen. Die Arbeit der Begleiterscheinungen, auf die es nicht ankommt, rechnet die Technik als Verluste. Ein Betrieb ist unter sonst gleichen Verhältnissen um so besser, je weniger solcher Arbeitsverluste auftreten, d. h. je mehr Arbeit in die nutzbringenden Wege gelenkt wird. Eine Wirkungsgradangabe bezieht sich stets auf einen bestimmten Teil des Weges der mechanischen Arbeit. Im Zweifelsfalle sind die Grenzen zu nennen.

Mit dem, was hier über die Arbeit gesagt ist, wird es klar, daß die mechanische Arbeit für den Techniker ein Gut ist, mit dem er sparsam wirtschaften muß, soweit nicht andere Opfer (z. B. an Zeit und Geld) auftreten, die in keinem gesunden Verhältnis zu dem Erlös an mechanischer Arbeit stehen. Der Vergleich des Wirtschaftens mit der Energie und mit dem Gelde liegt nahe.

Einzelfall. Ein Kohlenhaufen mit dem nötigen Sauerstoff der Luft stellt einen bedeutenden Energievorrat dar. Von dieser Energie gehen Teile verloren, denn schon durch Zertreten der Kohle wird ein kleiner Teil unbrauchbar; ein anderer Teil fällt unverbrannt durch den Rost, ein dritter Teil fliegt unverbrannt zum Schornstein hinaus. Nicht alle

Wärme der wirklich verbrannten Kohle erwärmt nutzbringend das Kesselwasser, ein Teil erwärmt die Kesselwände, den Schornstein und strömt aus; ein anderer Teil der Wärme muß mit den Verbrennungsgasen durch den Schornstein entweichen. Nicht aller Dampf, der im Kessel erzeugt wird, strömt nutzbringend in die Maschine; ein Teil kondensiert in den Dampfleitungen und geht dadurch verloren. Nicht alle Arbeit, die im Dampfe steckt, kann die Dampfmaschine ausnützen, ein Teil entgeht in Form von Wärme durch die Zylinderwände oder als unverbrauchter Dampf durch die Undichtheiten, ein Teil der Arbeit entweicht durch den Auspuff oder durch den Kondensator. Von der auf den Kolben übertragenen Arbeit zehrt die Reibung, die an vielen Stellen der Maschine auftritt, so daß an der Riemscheibe der Maschine nur ein geringer Bruchteil der Arbeit abgenommen werden kann, die ursprünglich in den Kohlen vorhanden war. Die besten Dampfmaschinen liefern am Schwungrad oder an ihrer Riemscheibe nur etwa 13% der in den Kohlen enthaltenen Arbeit nutzbar ab ($\eta = 0{,}13$). An der Riemscheibe der Dampfmaschine ist der Arbeitsweg aber noch nicht zu Ende; durch Transmission und alles, was von ihr betrieben wird, treten noch viele Verluste auf, so daß die letzte Nutzarbeit einen nahezu verschwindenden Bruchteil der aufgewendeten Arbeit ausmacht.

§ 7. Die Leistung.

Die Leistung (der Effekt) ist die in der Zeiteinheit auftretende Arbeit. Sie wird ausgedrückt durch eine Anzahl Meterkilogramm i. d. Sekunde (mkg/Sek.); 75 mkg/Sek. heißen eine Pferdestärke (PS).

Erläuterung. Bei vielen Betrachtungen ist es vorteilhafter, nicht die ganze Arbeit ins Auge zu fassen, die unabhängig von der Zeitdauer bei einem begrenzten, sich gleichmäßig abspielenden Vorgang auftritt, sondern die Arbeit i. d. Sekunde. Die Leistung bildet einen Maßstab für die Geschwindigkeit, mit der der Arbeitsumsatz vor sich geht.

Wird eine Arbeit (Bsp. Heben einer Last) von A mkg gleichmäßig in t Sekunden erledigt, so ist die Leistung L in mkg/Sek.:

$$L = \frac{A}{t}.$$

Wird eine Kraft von P kg mit einer Geschwindigkeit von v m/Sek. überwunden (Bsp. Transmissionsseil), so drückt sich die Leistung (in mkg/Sek.) auch aus:

$$L = P \cdot v.$$

Strömt ein motorisches Mittel beständig mit j kg/Sek. aus einer Höhe h (in m) zu (Bsp. Wasserkraft), so ergibt sich die auftretende Leistung (in mkg/Sek.) auch als:

$$L = h \cdot j.$$

Ebenso, wie bei dem Wirkungsgrad zwei Arbeitsmengen verglichen werden können, die beliebige Zeit dauern, so können auch zwei Arbeitsmengen verglichen werden, die beide eine Sekunde dauern. Ist diejenige Leistung, die bei einer Einrichtung zuzuführen ist, L_z, und die Nutzleistung, auf die es ankommt, L_n, dann ist der Wirkungsgrad auch ausgedrückt durch den Wert:

$$\eta = \frac{L_n}{L_z}.$$

2. Kapitel.

Die Wirkungen von Elektrizitätsmengen aufeinander.

§ 8. Die Erzeugung von Elektrizität durch Reibung und das Gesetz der Anziehung und Abstoßung von Elektrizitätsmengen. (Hist. 1 und 2)

Wir reiben einen polierten Hartgummistab mit einem Fuchsschwanz und bringen ihn vermöge eines Hütchens auf eine Spitze, so daß er wagerecht drehbar ist. Einen zweiten Hartgummistab reiben wir ebenfalls und bemerken nun, daß die geriebenen Stellen der beiden Stäbe sich gegenseitig abstoßen.

Außerdem reiben wir zwei Glasstäbe mit einem Seidenlappen; auch die Glasstäbe stoßen einander ab. Nähern wir aber den Glasstab dem Hartgummistab, oder umgekehrt, so bemerken wir eine gegenseitige Anziehung. Machen wir den entsprechenden Versuch mit einer Reihe von anderen Körpern, wie Harz, Schwefel, Paraffin usw., so können wir sie der Wirkung nach entweder zu der Hartgummiseite oder zu der Glasseite legen. Wir bezeichnen die Ursache dieser Erscheinungen als Elektrizität und wollen zunächst von zwei Elektrizitäten, der negativen (—), auf der Harzseite, und der positiven (+), auf der Glasseite, reden. Mit diesen Bezeichnungen können wir sagen:

(1) Gleichnamige Elektrizitäten (+ mit +, — mit —) stoßen einander ab, ungleichnamige (+ mit —) ziehen sich gegenseitig an.

Nähern wir nach dem Reiben eines beliebigen Stabes aus Glas oder Hartgummi sein Reibzeug, so findet jedesmal Anziehung statt. Daraus folgt:

(2) Bei der gegenseitigen Reibung zweier Körper wird stets der eine positiv, der andere negativ elektrisch.

Bei metallischen Körpern erkennen wir dieselben Erscheinungen,

wenn sie an einem solchen Material befestigt sind, das uns die obigen Erscheinungen selbst gezeigt hat, also an Glas, Siegellack, Hartgummi, Paraffin, Seide, Haar.

Streifen wir an einer beispielsweise auf Hartgummi befestigten Messingkugel einen elektrisierten Hartgummistab vorbei, so hören wir bei trocknem Wetter ein leises Knistern und sehen im Dunkeln schwache bläuliche Funken. Bringen wir nun die Kugel ohne sie zu berühren an den drehbaren, vorher geriebenen Hartgummistab, so erkennen wir wieder eine Abstoßung zwischen Kugel und Stab, also es hat sich die Elektrizität bei dem Überspringen der Fünkchen auf die Messingkugel übertragen. Dieselbe Erscheinung nehmen wir auch bei Anwendung von Glasstäben wahr.

Berühren wir nun die Kugel mit der Hand oder mit einem Metalldraht, der mit der Erde verbunden ist, so hört obige Erscheinung auf; wir haben mit der Berührung alle angesammelte Elektrizität von der Metallkugel heruntergenommen. Berühren wir dagegen einen geriebenen Hartgummi- oder Glasstab, so nehmen wir zwar die Elektrizität von der Berührungsstelle weg, aber an den Nachbarstellen ist noch Elektrizität vorhanden.

Die Körper, an denen wir unmittelbar durch Reibung die obigen Erscheinungen wahrnehmen können, leiten die Elektrizität nicht, ebenso ist trockne Luft ein Nichtleiter. Dagegen leiten, wie schon diese Versuche zeigen, die Metalle und der menschliche Körper die Elektrizität augenblicklich fort.* Nichtleiter heißen auch Isolatoren, Leiter auch Konduktoren.

(3) Die Größe der gegenseitigen elektrischen Kraftwirkung richtet sich sowohl nach den angesammelten Elektrizitätsmengen Q_1 und Q_2, als auch nach ihrem gegenseitigen Abstand r, und zwar ist von Coulomb[Hist. 15] für die Kraft P die Beziehung entdeckt worden:

$$P = c \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2},$$

die als das Coulombsche Gesetz bezeichnet wird. Die Größe c ist eine von den Maßsystemen für Kraft, Elektrizitätsmenge und Entfernung abhängige Konstante** (Elektrostatische Kräfte).

Erfolgt durch diese Kräfte eine gegenseitige Bewegung der Elektrizitätsmengen, so tritt mit der Bewegung Arbeit auf. Das Auftreten von Arbeit ist dadurch erklärlich, daß das vorherige Reiben der Körper mit einem Arbeitsaufwand verbunden war. Es ist bisher nicht gelungen, die Arbeit elektrostatischer Kräfte in den Dienst der Technik zu stellen.

* Näheres über Leiter und Nichtleiter siehe § 16.

** Vgl. hiermit das Gravitationsgesetz § 4 S. 4 Fußnote.

§ 9. Die Influenzerscheinung.

Eine Elektrizitätsmenge zieht bei einem ursprünglich unelektrischen Leiter, der sich in ihrer Nähe befindet, ungleichnamige Elektrizität an und stößt gleichnamige ab (Influenz). Entfernen wir die Elektrizitätsmenge aus der Nähe des Leiters, so wird er dadurch wieder unelektrisch. Daher ist die Vorstellung berechtigt, als enthielte jeder unelektrische Körper beide Elektrizitäten, positive und negative, in gleicher Menge gleichmäßig verteilt, so daß sich dadurch keine Wirkung ergibt. Eine benachbarte Elektrizitätsmenge scheidet in einem Leiter die beiden Elektrizitäten nach den Gesetzen der Anziehung und Abstoßung. Nimmt man bei einem isoliert aufgestellten Konduktor während der Annäherung eines elektrischen Körpers entweder die angezogene oder die abgestoßene Elektrizität durch Berührung weg, so bleibt nur eine Elektrizität darauf, die entweichende begibt sich in die leitende Umgebung (Erde); also kann man dem Leiter durch Influenz sowohl gleichnamige, als auch ungleichnamige Elektrizität erteilen.

Das im vorigen Paragraphen erwähnte Übergehen der Elektrizität von einem elektrischen Körper zu einem unelektrischen Leiter (bei Berührung oder in Form eines Funkens) bildet einen besonderen Fall der letztgenannten Erscheinung. Die beispielsweise auf einem Hartgummistab sich aufhaltende Minuselektrizität gleicht sich mit der von ihr aus dem Konduktor angezogenen Pluselektrizität zum Werte Null aus, während die abgestoßene Minuselektrizität nun allein auf dem Metallkörper verbleibt; das Ergebnis ist dasselbe, als ob die Minuselektrizität des Stabes auf das Metall übergegangen wäre.

§ 10. Der Kondensator.

Eine dünne Schicht eines Isoliermateriales (das Dielektrikum) trennt zwei Metallblätter (die Beläge) und ermöglicht so durch den geringen Abstand ein erhebliches gegenseitiges Festhalten (Binden, Ansammeln) von positiver und negativer Elektrizität.

Der Ausgleich der gebundenen Elektrizitätsmengen geschieht durch Herstellen einer leitenden Verbindung zwischen den beiden Belägen. Luft ist kein geeignetes Dielektrikum, da bei den geringen Abständen zu bald der Ausgleich in Form eines Funkens eintritt. Jeder mit Elektrizität behaftete Körper ist als Kondensatorbelag aufzufassen, wobei der ihn umgebende Luftraum das Dielektrikum und die weitere leitende Umgebung (die Erde) den zweiten Belag bildet.

Spezielle Formen von Kondensatoren sind die Leydener Flasche[Hist. 7]), die Franklinsche[Hist. 10]) Tafel und aus paraffiniertem Papier und Stanniol oder Glimmer und Stanniol hergestellte Kondensatoren der Meßtechnik.

Bringt man nun an den einen Belag eine Elektrizitätsmenge von bestimmter Polarität, so bildet sich durch Influenz die entgegengesetzte Polarität auf dem anderen Belag. Damit die gleichnamige (abgestoßene)

Elektrizität nicht hinderlich ist, verbindet man den zweiten Belag durch einen Leiter mit der Erde; die ungleichnamige strömt durch diesen Leiter nicht ab, da sie von der Seite des ersten Belages her gebunden wird.

Das Ansammeln von Elektrizitätsmengen an einem Kondensator heißt das Laden, das Ausgleichen der angesammelten Mengen das Entladen, die angesammelte Menge selbst die Ladung des Kondensators.

Je mehr Elektrizität an einem bestimmten Kondensator angesammelt wird, um so größer ist das Bestreben zum Ausgleich. Es tritt zwischen den Belägen eine Spannung auf, die zur Ladung proportional ist. Falls die Flächenausdehnungen der Beläge groß gegen ihren gegenseitigen Abstand sind, so gilt:

$$Q = E \cdot c \cdot \varepsilon \cdot \frac{F}{d};$$

dabei bedeutet:

Q = Ladung des Kondensators (= Q_1 = Q_2 in § 8),
E = die zwischen den Belägen herrschende Spannung,
c = Maßkonstante, d. h. eine Zahl, die nur von den gewählten Maßeinheiten abhängt,
ε = Materialkonstante des Dielektrikums (Dielektrizitätskonstante),
F = Kondensatorfläche (Größe des Belages),
d = Dicke der Isolationsschicht zwischen den Belägen.

Der Wert:

$$c \cdot \varepsilon \cdot \frac{F}{d} = C$$

ist eine Apparatkonstante, die als die Kapazität eines Kondensators bezeichnet wird. Demnach gilt auch:

$$Q = E \cdot C.$$

Die in einem Kondensator aufgespeicherte Arbeit ist:

$$A = K \cdot \frac{Q \cdot E}{2} = K \cdot \frac{C \cdot E^2}{2},$$

wobei K eine Proportionalitätskonstante bedeuten soll, die von der Wahl der übrigen Einheiten abhängt. Weiteren Aufschluß über die hier vorkommenden Größen gibt § 68, der unter Absatz N auf diese Angaben zurückgreift.

§ 11. Das Potential.

Bei allen Ausgleichsvorgängen in der Natur gibt es ein Gefälle, und der Ausgleich erfolgt überall so weit, bis zwischen den sich ausgleichenden Mengen dasselbe Niveau erreicht ist. Welche Größen als Niveaugrößen aufzufassen sind, sollen einige Beispiele zeigen:

In einem U-Rohr sei eine Wassersäule so festgehalten, daß die Spiegel auf beiden Seiten in verschiedener Höhe liegen. Lassen wir

den Ausgleich zustande kommen, so teilt das eine Rohr dem anderen so viel Wassermenge mit, bis die Höhenlage beider Spiegel gleich ist. Die Höhenlage ist hier die Niveaugröße. Der Ausgleich ist überall möglich, wo ein Unterschied der Höhenlagen vorhanden ist. Dieses U-Rohr könnte nach seinem Ausgleich mit einem anderen Gefäß verbunden werden, zu dem ein neuer Ausgleich stattfinden kann, wenn zwischen dem jeweiligen und dem neuen Spiegel wieder ein Abfall auftritt. Zu der Bemessung der Höhenlagen wählt man in der Technik vorteilhaft einen Ausgangspunkt, der für die Rechnungen einen Grenzwert bedeutet, das ist in diesem Fall der Meeresspiegel, da bis zu ihm das Gefälle ausnutzbar ist. Dieser Ausgangspunkt für die Maßbezeichnungen heißt der Nullpunkt.

Verbinden wir zwei dicht verschlossene Gefäße, in denen ungleicher Luftdruck herrscht, so gibt das eine Gefäß so lange Luft an das andere ab, bis der spezifische Druck in beiden Gefäßen derselbe ist. Hier ist der spezifische Druck die Niveaugröße. Die Gefäße können nach ihrem Ausgleich an ein drittes Gefäß wieder Luft abgeben, wenn der jeweilige spezifische Druck in unserem Behälter höher ist, als in dem dritten Gefäß, oder was dasselbe heißt, wenn von dem einen zum anderen Raum ein Druckabfall auftritt, oder wenn in dem ersten Raum gegen den anderen ein Überdruck vorhanden ist. Als Nullpunkt des Druckes rechnet man das Vakuum, da dieses die untere Grenze bildet, über die hinaus kein geringerer Druck gedacht werden kann.

Bringen wir zwei verschieden erwärmte Körper aneinander, so gibt der eine dem anderen so lange Wärmemenge ab, bis die Temperaturen beider Körper gleich sind. Die Temperatur ist hier die Niveaugröße. Einem dritten Körper kann unsere Körpergruppe nach ihrem Ausgleich Wärme abgeben, wenn der dritte Körper niedrigere Temperatur hat, als die oben erzeugte Ausgleichstemperatur, also wenn wiederum ein Abfall, hier ein Temperaturabfall vorhanden ist. Als Nullpunkt der Temperatur rechnet man die Temperatur des schmelzenden Eises, wobei niedrigere Werte durch negatives Vorzeichen angedeutet werden.

Entsprechend diesen drei Beispielen können wir auf elektrischem Gebiet sagen: Ein Körper kann einem anderen eine Elektrizitätsmenge erteilen, wenn zwischen beiden eine elektrische Niveaudifferenz vorhanden ist; sie wird bezeichnet mit dem Ausdruck Spannung. Nach dem Ausgleich kann die Körpergruppe einem dritten Körper wiederum Elektrizität abgeben, wenn eine weitere Niveauerniedrigung zu dem dritten Körper hin aufzuweisen ist. Nach dem Ausgleich befinden sich die Körper auf demselben elektrischen Niveau. Die Elektrotechnik unterscheidet sich in ihrer Bezeichnungsweise von den anderen technischen Gebieten dadurch, daß sie für den Niveauwert ein anderes Wort hat, als für die Niveaudifferenz. Die Niveaudifferenz heißt die Spannung, der Niveauwert vom Nullpunkt aus gerechnet das Potential. Die Worte Potentialdifferenz und Spannung haben die gleiche Be-

deutung. Den Nullpunkt bildet für die Bemessung des Potentiales der elektrische Niveauzustand der Erde. Ein niedrigeres Potential wird (wie bei der Temperatur) mit negativem Vorzeichen angedeutet. Die Unterscheidung zweier Pole als positiv und negativ elektrisch deutet nur eine Niveauverschiedenheit im elektrischen Zustand an. So z. B. kann ein Körper zur Erde + 900 Potentialeinheiten, ein anderer zur Erde + 600 Potentialeinheiten aufweisen, so beträgt die Spannung zwischen beiden 300 Einheiten; der erste ist positiv gegen den zweiten. Dasselbe ist in gleicher Weise der Fall, wenn der erste z. B. unter + 150, der zweite unter — 150, der erste z. B. unter — 300, der zweite unter — 600 Potentialeinheiten sich befindet. In obigen Fällen unterscheidet sich die Wirkung der beiden Körper aufeinander, wenn alles übrige gleich bleibt, in nichts voneinander. Scheinbare Abweichungen hiervon rühren her von der Umgebung, die als dritter Körper aufzufassen ist. Es gehört zur Richtigkeit dieses Satzes, daß das Potential der Umgebung (allgemein Nicht-Erde) der beiden Körper relativ zu den beiden Körpern das gleiche ist.

Mit diesen Erörterungen ist nunmehr die Vorstellung von den zwei Elektrizitäten, der positiven und der negativen aufgehoben und der Begriff des Potentialunterschiedes an ihre Stelle getreten, wobei die Bezeichnung positiv und negativ nur einen Richtungssinn ausdrückt.

§ 12. Die Spitzenwirkung.

Die einzelnen Teilchen der Ladung eines Körpers üben aufeinander eine abstoßende Wirkung aus. Dadurch entstehen zwischen ihnen an der äußeren Begrenzung eines Leiters von seiner Oberfläche fortgerichtete Kräfte. Das Potential eines beliebig geformten, mit Elektrizität geladenen Leiters ist an allen Stellen dasselbe. Die Kräfte an der Oberfläche sind aber nur bei der Kugelform an allen Stellen der Begrenzung gleich. Bei beliebiger Begrenzung sind die abstoßenden Kräfte da größer, wo der Krümmungsradius der Oberfläche nach außen hin gerechnet kleiner ist. Als einen Oberflächenteil mit kleinstem Krümmungsradius haben wir eine Spitze anzusehen. An einer mathematisch gedachten, an der Oberfläche liegenden Spitze werden die Abstoßungskräfte unendlich groß, daher muß durch die mathematische Spitze die gesamte Ladung bis zum Potential der Umgebung (Erde) ausströmen. Tatsächlich herstellbare Spitzen lassen einen erheblichen, aber nie einen vollkommenen Ausgleich zustande kommen.

Die Spitzenwirkung benutzen wir beispielsweise bei der Elektrisiermaschine: Ein Konduktor besitzt eine Anzahl von Spitzen, die gegen eine, durch ein amalgamiertes Reibzeug elektrisierte, drehbare Glasscheibe gerichtet sind. Die Pluselektrizität des Glases wirkt influierend auf den Konduktor, und zwar stößt sie die positive Elektrizität ab in den Konduktor hinein; die negative wird angezogen und durch die Spitzen mit der positiven des Glases ausgeglichen. Der

Erfolg ist der, als ob die Spitzen die Pluselektrizität der Scheibe in den Konduktor eingesaugt hätten.

Bei dem Ausströmen der Elektrizität durch Spitzen beobachtet man im Dunkeln schwache, bläuliche, kegelförmige Lichterscheinungen, das Büschellicht. Sowohl beim Büschellicht, wie beim Funken rührt die Lichterscheinung her von glühenden Teilchen der Materie (Luft, Metall der Übergangsstelle), die von der selbst nicht sichtbaren Elektrizität beim Ausgleich erwärmt werden.

Außer der in § 8 erwähnten Arbeit elektrostatischer Kräfte tritt also, wie sich hier schon erkennen läßt, bei elektrischen Vorgängen auch Arbeit in Form von Wärme auf.

§ 13. Die Gebäudeblitzableiter.

Die bei dem Gewitter wahrzunehmenden Erscheinungen zeigen die bei der Elektrizität auftretende mechanische Arbeit sehr deutlich. Angriffspunkte eines Blitzes weisen Brandstellen und an Metall Schmelzstellen auf, zeigen also erhebliche Wärmeentwicklung. Die Bahn des Blitzes an einem Baume ist erkennbar durch die abgespaltene Rinde; es wirkt hier ebenfalls die Wärme, die auf der Bahn des Blitzes plötzlich auftritt, die eingeschlossene Luft ausdehnt, das Wasser des Holzes verdampft und auf diese Weise die explosionsartige Wirkung hervorbringt. Gegen die verheerende Wirkung des plötzlichen Ausgleiches, der zwischen der Elektrizität der Wolke und der Erde vor sich geht, schützen wir unsere Gebäude durch die Blitzableiter.

Eine mit der Erde elektrisch gut verbundene metallische Leitung umspannt das Gebäude (am besten vollständig), führt zu den emporragenden Teilen des Gebäudes und endigt über diesen in einer Spitze [Hist. 10].

Der Ausgleich der Elektrizität zwischen Wolke und Erde erfolgt nun durch diese Leitung allmählich, indem die Elektrizität an der Spitze ausströmt. Die Wirkung wird dadurch über eine geraume Zeit verteilt und tritt nicht mehr verheerend auf.

Wir unterscheiden an einem Blitzableiter:

1. Die Erdleitung.

Bestehend aus einem sich in der Erde unter Benutzung feuchter Stellen möglichst weit ausbreitenden Metallkörper (Erdplatten, Erdnetze, verzweigte Drahtseile, Eisenstangen und Eisenrohre). Damit ist gut metallisch verbunden:

2. Die Gebäudeleitung.

Eine womöglich aus einem Stück bestehende Leitung aus Kupfer vom 50 qmm Querschnitt (oder Eisen von 100 qmm) verbindet auf den kürzesten Wege unter Vermeidung von Ecken und Schleifen (erforderliche Bogen mit großem Krümmungsradius!) die Erdplatte mit der Spitze; sie ist mit Mauerhaken ohne besondere Isolatoren sturmsicher angebracht; nötige Verbindungsstellen sollen großflächige Berührung haben und werden am besten verlötet.

3. Die Fangstange mit Spitze.

Die meistens etwa 3 m hohe, in dem Dachstuhl befestigte eiserne Fangstange bildet entweder selbst einen Teil der Leitung oder die kupferne Leitung, geht an ihr entlang bis zur Spitze. Die Spitze selbst besteht gewöhnlich aus 2 cm dickem Kupfer und läuft kegelförmig etwa unter 60 Grad aus.

Beschreibt man von der Spitze aus einen geraden Kegel, dessen Grundfläche die Höhe der Spitze zum Radius hat, so nennt man den durch diesen Kegel begrenzten Raum den einfachen Wirkungskreis oder den einfachen Kegel. Der Kegel, der die doppelt genommene Höhe zum Radius hat, heißt der zweifache Kegel. Die im einfachen Kegel liegenden Teile des Gebäudes sind im allgemeinen besser geschützt, als die im doppelten, jedoch es ist auch im doppelten Kegel, falls der Blitzableiter gut imstande ist, äußerst selten, daß der Blitz an einer anderen Stelle, als an der Spitze angreift. Befindet sich eine Spitze sehr hoch (z. B. an Kirchtürmen, Schornsteinen) über den weiter unten zu schützenden Teilen, so ist es nötig, auch innerhalb des einfachen Schutzkegels in weiterer Tiefe nochmals Fangstangen anzubringen. Eine Vergrößerung der Blitzgefahr durch Unvollkommenheiten des Blitzableiters ist im allgemeinen nicht zu befürchten.

Alle ausgedehnten Metallteile des Hauses, die Gratbleche, Turmknäufe, die Regenrinnen und Regenabfallrohre, eiserne Träger, Wasserleitungen und Gasleitungen empfiehlt es sich mit dem Blitzableiter gut leitend zu verbinden, und zwar da, wo sie der Gebäudeleitung bzw. der Erdleitung am nächsten sind; gerade die Wasser- und die Gasleitung anzuschließen, ist sehr wichtig, weil die Elektrizität immer den bestleitenden Weg bevorzugt. Die ausgedehnten Wasser- und Gasrohre einer Ortschaft geben einen viel leichteren Übergang, als die Erdplatten, daher könnte ohne Anschluß der Blitz am Gebäude vom Blitzableiterdraht auf die Rohrleitungen überspringen und Schaden anrichten. Die meisten Werke genehmigen jetzt einen ordnungsmäßig hergestellten Anschluß an ihre Rohrleitungen, falls außerdem wirksame Erdplatten vorhanden sind. Eine angeschlossene Wasser- oder Gasleitung ist weniger gefährdet, als eine nicht angeschlossene.

---

3. Kapitel.

Die Wirkungen der strömenden Elektrizität.

(Versuche.)

§ 14. Die verwendete Schaltung (Fig. 3).

Wir stellen eine Schaltung her nach der angegebenen Skizze Fig. 3; *S* bedeutet darin die Einrichtung, die imstande ist uns andauernd strömende Elektrizität zu liefern, wir bezeichnen sie als die Strom-

quelle.* An ihr unterscheiden wir einen positiven und einen negativen Pol; die Pole sind die Anschlußstellen für die Schaltung.

Von dem positiven Pol der Stromquelle führt ein Kupferdraht zu dem linken Kontakt eines vorläufig noch geöffneten Ausschalthebels *h*. Ein Ausschalter ist eine Vorrichtung, bei der ein stromleitendes Schlußstück zwischen den auf Isoliermaterial angebrachten Anschlußstellen, den Kontakten, eingeschaltet werden kann.

Von dem rechten Kontakt des Ausschalters aus ist ein Kupferleiter zu einem dünnen Draht (1) gelegt, der zwischen zwei Klemmen eingespannt sein soll. Die zweite Klemme dieses Drahtes ist mit dem oberen Stift eines Kohlenpaares (2) leitend verbunden. Die Kohlenstifte berühren sich leicht. An den unteren Kohlenstift schließt sich eine Verbindung zu der linken in Kupfervitriollösung stehenden Kohlenplatte (3). Von der rechten Kohlenplatte aus ist der Stromweg über

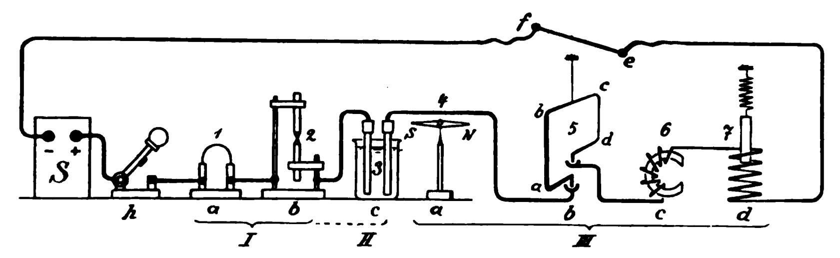


Fig. 3. Schema der Versuchsanordnung zur Erläuterung der Stromwirkungen.

eine frei drehbare Magnetnadel (4) geleitet, so daß der Draht parallel zur Ruhestellung der Nadel liegt. Dieser Draht führt zu einem Quecksilbernapf, in den zugleich das Ende eines frei drehbaren Kupferbügels (5) taucht, dessen anderes Ende in einen zweiten Quecksilbernapf hineinreicht. Von da aus umgibt ein Draht, der mit Baumwolle isoliert ist, mit vielen Windungen ein hufeisenförmiges Stück weichen Eisens (6). Das Ende dieses Drahtes ist verbunden mit einer zweiten Spule (7), in der ein Eisenkern beweglich ist. Schließlich legen wir von hier aus eine Verbindung zum Minuspol der Stromquelle.

Die Schaltung zeigt in diesem Zustand keine Wirkungen, da der Stromweg am Ausschalter noch unterbrochen ist.

Die einzelnen Apparate befinden sich bei dieser Anordnung in Hintereinanderschaltung.

§ 15. Die Wirkungen der strömenden Elektrizität.

Drücken wir in der in § 14 beschriebenen Schaltung den Hebel des Ausschalters *h* nieder, so erkennen wir zunächst sehr geringe Wirkungen, falls nur eine der Stromquellen verwendet wird. Geringe

* Hier und im folgenden seien, wenn etwas anderes nicht ausdrücklich betont wird, Akkumulatoren als Stromquellen verwendet.

magnetische Wirkungen, z. B. eine Bewegung der Magnetnadel, sind zunächst die einzigen sofort wahrnehmbaren Änderungen.

Verwenden wir an Stelle der einen Stromquelle deren mehrere derart, daß der Pluspol der ersten mit dem Minuspol der zweiten, der Pluspol der zweiten mit dem Minuspol der dritten usw. verbunden wird, so erhalten wir eine Batterie. Der erste Minuspol und der letzte Pluspol bilden die Pole der Batterie. Die Schaltung der Einzelstromquellen in diesem Sinne heißt Hintereinanderschaltung.

Nach Hintereinanderschaltung mehrerer Stromquellen nehmen wir wahr: Die Wirkungen treten sämtlich deutlicher und stärker hervor, und wir unterscheiden dabei folgendes:

I. Der dünne Draht (1) erwärmt sich[Hist. 9]).
Die Berührungsstelle (2) der Kohlenspitzen wird heiß.

II. Die rechts stehende Kohlenplatte (3) überzieht sich mit Kupfer, während die linke Platte unverändert bleibt (an ihr vollzieht sich Ausscheidung von Sauerstoff)[Hist. 13]).

III. a) Die Magnetnadel (4) wird abgelenkt, und zwar geht der Nordpol nach hinten[Hist. 20]).
b) Nähern wir einen Teil der Leitung (*ef*) dem beweglichen Kupferbügel (5) bei *a b*, so daß *a* mit *e* und *b* mit *f* zusammenkomme, so ziehen sich die genäherten Drähte gegenseitig an. Kommt *a* an *f* und *b* an *e*, stoßen sie einander ab. Kreuzen wir *ef* mit *bc*, so stellen sich die Drähte ein, daß *f* an *c* und *b* an *e* kommt[Hist. 21]).
c) Das weiche Eisen (6) ist magnetisch gemacht, oder was dasselbe heißt, magnetisiert worden[Hist. 17]).
d) Der Eisenkern (7) wird in die Wicklung gezogen und wird ebenfalls ein Magnet.

Nähern wir eine Magnetnadel dem magnetisierten Eisen (bei 6 oder 7), so wird die Südspitze der Magnetnadel unten angezogen, die Nordspitze unten abgestoßen; dagegen wird oben die Südspitze abgestoßen und die Nordspitze angezogen. Nimmt man nun bei 7 den Eisenkern aus der Wicklung heraus, so daß sich in der Spule kein Eisen befindet, so stellt sich die Magnetnadel in der Nähe der Spulenenden in derselben Weise ein. Eine stromdurchflossene Spule wirkt wie ein Magnet.

Öffnen wir den Ausschalter, so verschwinden alle Wirkungen, nur bleibt das ausgeschiedene Kupfer bestehen und das magnetisiert gewesene Eisen behält eine Spur von Magnetismus.

Eine weitere Vermehrung der hintereinandergeschalteten Stromquellen zeigt:

I. Der dünne Draht wird glühend.
Die Berührungsstelle der Kohlenspitzen wird glühend und erzeugt ein helles weißes Licht[Hist. 18 u. 19]), den elektrischen Lichtbogen, wobei die Kohlenenden langsam abbrennen.

II. Das Kupfer scheidet sich schneller, aber weniger rein aus.
III. a) Die Magnetnadel wird mehr abgelenkt.
b) Die Kräftewirkung zwischen den Drähten ist größer.
c) Das weiche Eisen wird stärker magnetisch.
d) Der Eisenkern wird kräftiger in die Spule gezogen.

Unter Verwendung einer abermals vergrößerten Anzahl von hintereinandergeschalteten Stromquellen werden alle Wirkungen abermals gesteigert; so z. B. brennt der dünne Draht durch und muß durch einen dickeren ersetzt werden; wir beobachten die Wärmeentwicklung auch an einem Thermometer in der Kupfervitriollösung und an allen Drähten, der Lichtbogen gibt eine größere Lichtfülle, das Kupfer wird aus der Lösung sehr schnell und flockig ausgeschieden.

Nehmen wir eine Vertauschung zwischen den Enden unserer Schaltung und den Polen der Stromquelle vor, so erscheinen die Wärmewirkungen I und die Wirkungen IIIb bis IIId unverändert wieder, während (II) sich das Kupfer von der rechten Platte allmählich ablöst und an die linke ansetzt; die Magnetnadel (IIIa) schlägt nach der anderen Seite aus. Gehen wir mit der Magnetnadel zu den Spulen, so erkennen wir ebenfalls umgekehrte Kraftwirkung zwischen Spule und Magnetnadel.

Benutzen wir eine Stromquelle (Wechselstrommaschine), die uns die Vertauschung der Pole in sehr schneller Aufeinanderfolge (pro Sekunde etwa 100 mal) vornimmt, so bleiben die Wärmewirkungen I und die Wirkungen IIIb bis IIId bestehen, nur schwirrt der Lichtbogen etwas, die Spulen verursachen ein brummendes und angezogene Eisenteile ein schwirrendes Geräusch, dagegen verschwinden die Wirkungen II (die Kupferausscheidung) und IIIa (die Wirkung auf die Magnetnadel) ganz. Nimmt man einen Eisenkern aus seiner Spule heraus, während der Hebel *h* eingeschaltet ist, so zeigt es keine Spur von rückbleibendem Magnetismus.

Zusammenstellung der aus den beschriebenen Versuchen erkannten Wirkungen.

Wir unterscheiden:

I. Die Wärmewirkung:
a) im stromdurchflossenen Draht,
b) im Lichtbogen,
c) in stromdurchflossenen Flüssigkeiten.

II. Die chemische Wirkung:
im Beispiel der Kupferausscheidung (Kupferwanderung).

III. Die magnetische Wirkung (mechanische oder Fernwirkung):
  a) Die Kraftwirkung zwischen Strom und Stahlmagnet (Nadel).
  b) Die Kraftwirkung der Ströme aufeinander (dynamische Wirkung).
  c) Die magnetisierende Wirkung.
  d) Die Kraftwirkung zwischen Spule und weichem Eisen (Weicheisenwirkung).

§ 16. Gute Leiter, zersetzbare Leiter, Nichtleiter.

1. Gute Leiter (Leiter 1. Klasse) sind alle Metalle, sowie Kohle. In ihnen findet bei Stromdurchgang nur eine Wärmeentwicklung statt; sie bleiben durch den Strom chemisch unverändert.

2. Zersetzbare Leiter (Leiter 2. Klasse) sind alle wäßrigen Lösungen von Salzen und Säuren, sowie einige sonst isolierende Körper in Glühhitze. Die zersetzbaren Leiter leiten den Strom schlechter, als die Leiter 1. Klasse und nur, indem sie sich zersetzen, so daß die getrennten (dissoziierten) Teilchen als Träger der Elektrizitätsmengen angesehen werden können.

3. Nichtleiter (Isolatoren) sind solche Materialien, die den Strom so wenig leiten, daß man sie in der Anwendung als Nichtleiter bezeichnet. Die am meisten in Frage kommenden Isoliermaterialien sind:

a) Trockene Luft und trockene Gase in unverdünntem Zustande.

b) (Mineralischen Ursprunges): Glimmer, Asbest, Marmor, Schiefer, Quarz, Schmirgel, Gips, Schwefel, Asphalt, Paraffin, Vaselin, Petroleum, Ligroin, Benzin.

c) (Pflanzlichen Ursprunges): Harze und Lacke, Gummi (natürlicher), Guttapercha, Öle und Fette, Alkohol, Baumwolle, Papier, trocknes Holz (letzteres der Feuersgefahr wegen bei Installationsmaterialien verboten!).

d) (Tierischen Ursprunges): Elfenbein, Bein, Horn, Seide, Öle und Fette, Leder, Haar, Wolle.

e) (Künstlich zusammengestellte Isolier-Materialien): Glas, Porzellan, Steingut, Gummi (vulkanisierter und Hartgummi oder Ebonit), Papier und Isolierpappe (Vulkanfiber und Preßspan), Mikanit (Glimmer mit Bindemitteln), Zelluloid (der hohen Feuersgefahr wegen in der Technik nicht verwendbar!), Stabilit, Eburin, Ambroin, Vulkanitasbest, Asbestonit, Megohmit, Okonit, Linoleum u. a., sowie verschiedene Isolierkitte und Isolierlacke.

Die Isolationsfähigkeit aller dieser Materialien erstreckt sich nur auf Temperaturen, die nicht zu hoch liegen. Isoliermaterialien, die bei hohen Temperaturen (Rot- und Weißglut) nicht verbrennen (Glas, Porzellan, Gesteinsarten) sind in diesem Zustand Leiter 2. Klasse. Die vielen aufgezählten Kunsterzeugnisse, die nur die wichtigsten sind, lassen darauf schließen, was auch tatsächlich zutrifft, daß es bequeme Isoliermaterialien nicht gibt; unter bequem sei verstanden, daß die Materialien fest, auch auf Zug beanspruchbar und wie die Metalle bearbeitbar,

dabei feuersicher und nicht zu teuer sind. Am nächsten kommt bei diesen technischen Ansprüchen Elfenbein in Frage, das seines hohen Preises wegen nur für feine Meßinstrumente verwendet werden kann.

§ 17. Lehrsätze zu den Stromwirkungen.

Die Ursache der bei Herstellung eines leitenden Stromweges zwischen den Polen einer Stromquelle wahrgenommenen Erscheinungen nennen wir den elektrischen Strom. Das Vorhandensein des Stromes erkennen wir an dem Vorhandensein seiner Wirkungen. Die Stärke des Stromes erkennen wir an der Stärke der Wirkungen, die wir an einer und derselben Versuchsanordnung beobachten.

Der Strom fließt von dem positiven Pol der Stromquelle durch die Leitung zum negativen Pol und in der Stromquelle vom negativen zum positiven Pole zurück. Der dabei auftretende Kreislauf und seine konkret vorliegende Bahn heißt der elektrische Stromkreis, an dem man den Außenkreis, vom Pluspol durch den Leitungsdraht zum Minuspol, und den Innenkreis, vom Minuspol durch die Stromquelle zum Pluspol, unterscheidet. Die Stromstärke ist bei reiner Hintereinanderschaltung aller Teile an allen stromdurchflossenen Querschnitten gleich.

Ein Stromkreis ist geschlossen, wenn in allen Teilen die leitende Verbindung hergestellt ist, so daß der Strom fließt. Ein Stromkreis ist offen (unterbrochen), wenn stellenweise die leitende Verbindung fehlt, also der Strom nicht fließt.

Ein Strom, der dauernd nach derselben Richtung in gleichmäßiger Stärke fließt, heißt Gleichstrom. Ein Strom, der periodisch unterbrochen und in der gleichen Richtung geschlossen wird, heißt intermittierender Gleichstrom. Ein Strom von periodisch wechselnder Richtung heißt Wechselstrom.

I. Die Wärmewirkung tritt bei beiden Stromrichtungen in gleicher Weise auf und ist daher auch bei Wechselstrom vorhanden. Unter Vorhandensein eines Stromes von bestimmter Stärke ist die Wärmewirkung an dünnen Drähten leichter wahrzunehmen, als an dicken.

Der Lichtbogen entsteht erst, nachdem (z. B. durch gegenseitige Berührung der Stifte) der Strom geschlossen worden ist. Nach Herstellung des Stromschlusses können die Stifte, je nach der Zahl der hintereinandergeschalteten Stromquellen, mehr oder weniger ein Stück voneinander entfernt werden. Ein Lichtbogen entsteht auch zwischen Metallenden, aber mit dem Unterschied gegen Kohle, daß die Metalle schmoren und gefärbtes Licht zeigen, während Kohle sauber brennt und weißes Licht gibt. Die Temperatur des Lichtbogens (etwa 4000 Grad) ist die höchste künstlich herstellbare. Es gibt keinen Körper, der im Lichtbogen nicht verbrennt. Das Material der Leiterenden wird durch den Lichtbogen verzehrt, so daß bei feststehenden Stiften sich der Abstand immer mehr vergrößert, bis der Strom unterbrochen wird, indem

der Lichtbogen abreißt. Bei nachgeschobenen Kohlen beobachtet man, daß bei gleichen Kohlenmaterialien und gleicher Dicke der Stifte die am positiven Pol liegende Kohle etwa doppelt so schnell abbrennt, wie die negative (genauer im Verhältnis etwa wie 9 : 4); die positive Kohle wird dabei heißer und höhlt sich kraterförmig aus (vgl. Fig. 4), während die negative spitz abbrennt. Der Krater der positiven Kohle ist der hauptsächliche Ausgangspunkt des Lichtes.

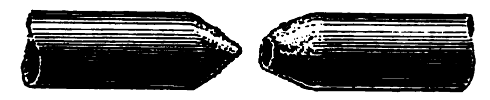


Fig. 4. Abbrand von Kohlestäben.

Bei Wechselstrom brennen die beiden gleich dicken Kohlen gleich schnell und in gleicher Form ab und verbreiten ein nach beiden Polen hin gleichmäßig verteiltes Licht, an dem jedoch durch geeignete Bewegung eines hellen Gegenstandes die Stromwechsel erkannt werden können.

II. Eine chemische Wirkung, für die die Kupferausscheidung bei den Versuchen des § 15 nur ein Beispiel gab, tritt jedesmal da auf, wo ein Gleichstrom eine wäßrige Lösung eines Salzes oder einer Säure (oder einen hochgradig erhitzten Körper mineralischer Natur) durchläuft. Reines Wasser ist nicht stromleitend, erst vermöge der gelösten Substanzen leitet es den Strom. Weitere Beispiele sind:

Die Wasserzersetzung: Wasser, das mit einem beliebigen geringen Zusatz stromleitend gemacht ist, zerlegt sich in seine Bestandteile, Wasserstoff (zwei Volumteile) und Sauerstoff (ein Volumteil), die in diesem Verhältnis gemischt das Knallgas ergeben, welches nach Entzündung detoniert und sich dabei zu Wasser zurückbildet.

Die Ausscheidung von anderen Metallen, Silber, Nickel, Gold, Platin usw. aus ihren Salzen in wäßriger Lösung.

Die Moleküle werden bei jeder Zersetzung in Atome oder Atomgruppen zerlegt, von denen der eine Teil (metallischer Natur, einschließlich des Wasserstoffes) in Richtung des Stromes wandert, der andere Teil gegen den Strom. Der Vorgang der Zersetzung durch den Strom heißt Elektrolyse, der zersetzbare Leiter der Elektrolyt, die Einführungsstücke des Stromes in den zersetzbaren Leiter die Elektroden. Die Elektrode am positiven Pol (die Eintrittsstelle des Stromes) heißt die Anode, diejenige am negativen Pol (die Austrittsstelle des Stromes) die Kathode. Die dissoziierten Teilchen heißen die Ionen, das mit dem Strom zur Kathode gehende Teilchen das Kation, das gegen den Strom zur Anode gehende das Anion. Aus obigem folgt:

Alle Metalle wandern bei der Zersetzung durch den Strom in gleichem Sinn, nämlich zur Kathode. Die Richtung, nach der die Metalle wandern, ist die Richtung des Stromes.

In einem und demselben Stromkreise werden bei hintereinandergeschalteten Bädern aus verschiedenen Elektrolyten in gleichen Zeiten Ausscheidungsmengen erzeugt, die zueinander proportional sind, wenn man den Versuch mit veränderter Stromstärke wiederholt. Scheiden wir z. B. die dreifache Kupfermenge aus gegen einen früheren Fall, so hat das auch die Ausscheidung der dreifachen Silber-, Nickel-, Wasserstoff-, Sauerstoffmenge usw. zur Folge. Weiterhin gibt eine Änderung der Zeit des Stromdurchganges ebenfalls eine zu ihr direkt proportionale Änderung der Ausscheidungserzeugnisse in jeder Zersetzungszelle.

Diese bequeme Gesetzmäßigkeit gilt unabhängig von Form und Größe der Gefäße und unabhängig von Sättigungsgrad und Temperatur der Lösungen, und hat dazu geführt, die Stromstärke grundsätzlich nach der in der Zeiteinheit entwickelten Menge der Ausscheidungsprodukte zu bemessen (vgl. w. u. die Voltameter und die Festlegung des Ampere).

Gleiche Ströme scheiden in gleichen Zeiten, auch an Anode und Kathode, äquivalente Mengen aus. Für verschiedene Ströme und Zeiten gilt das Faradaysche[Hist. 26]) Gesetz: Das Produkt aus Stromstärke und Zeit ist der Zahl der bei der Zersetzung auftretenden Grammäquivalente proportional. Durch diese Gesetzmäßigkeit sind die Ausscheidungsmengen verschiedener Zellen, die eine aus der anderen, berechenbar.

Beispiel. Ein Strom scheidet in einer Sekunde aus Silbernitrat 0,001118 g Silber aus, also in der Minute $60 \cdot 0{,}001118 = 0{,}06708$ g oder $p_{Ag} = 67{,}08$ mg Silber aus. Kupfer ist zweiwertig, Silber ist einwertig. Das Atomgewicht des Kupfers beträgt $\gamma_{Cu} = 63{,}6$ und das des Silbers $\gamma_{Ag} = 107{,}93$. Wieviel Kupfer wird durch den gleichen Strom in gleicher Zeit ausgeschieden?

Lösung: Für den Zeitraum einer Minute gilt:

$$p_{Cu} = p_{Ag} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{Cu}}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{63{,}6}{107{,}93} = 19{,}76 \text{ mg.}$$

Der gleiche Strom scheidet in der gleichen Zeit 19,76 mg Kupfer aus.

Das Faradaysche Gesetz führt zu der Auffassung des Transportierens von Elektrizitätsmengen kleinster Art mit den Ionen, so daß jede Valenz mit einem Teilchen geladen ist, wobei positive und negative Teilchen angenommen werden müssen, die gegeneinander ihre Bewegung ausführen. Diese kleinsten Teilchen von Elektrizität sind die elektrochemischen Elektronen.

Der Richtungssinn der chemischen Zersetzung ist mit Änderung der Stromrichtung umkehrbar, daher werden durch Wechselströme in

Summa keine Zersetzungserzeugnisse ausgeschieden. Jeder Stromstoß in dem einen Sinn hebt die Wirkung des vorhergehenden Stromstoßes im anderen Sinn auf.

III. Die Magnetnadel befolgt die von Ampère[Hist. 21]) aufgestellte Schwimmregel: Man denke sich mit dem Strome schwimmend, den Kopf voran, und richte den Blick auf die Nordspitze der Nadel, so bewegt sich der Nordpol vom Schwimmer aus gesehen zur linken.

An der Magnetnadel wirkt bei Wechselstrom eine Summe von Kraftimpulsen in schneller Aufeinanderfolge, von denen der eine nach rechts,

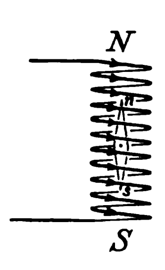


Fig. 5. Magnetische Pole einer Stromspule.

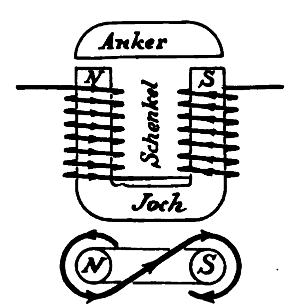


Fig. 6. Bewicklung der Schenkel eines Hufeisenmagneten.

der andere nach links dreht. Die Magnetnadel kann in den gewöhnlichen Fällen infolge ihrer Masse den Impulsen nicht folgen, so daß die Wirkung scheinbar verschwindet, da die Summe der Impulse über eine gerade Zahl von Wechseln gleich Null ist. Nur bei sehr geringen Massen und großen zurücktreibenden Kräften (bei hoher Eigenschwingungszahl) treten andere Erscheinungen auf.

Eine stromdurchflossene Spule (ein Elektromagnet) hat den Nordpol an dem Ende, nach welchem eine in der Spule frei drehbar gedachte Magnetnadel mit der Nordspitze zeigen würde (vgl. Fig. 5 und 6).

Die Kraftwirkung eines Elektromagneten auf weiches Eisen ist bei beiden Stromrichtungen anziehend, d. h. durch Umkehr des Stromes nicht umkehrbar und daher auch bei Wechselstrom vorhanden. Ein Anker eines Elektromagneten bleibt auch bei Wechselstrom angezogen, obgleich es Augenblicke gibt, in denen der Strom gleich Null ist. Die Masse des Ankers verhindert in der kurzen Zeit der Stromlosigkeit eine Entfernung des Ankers von den Polen. Nur bei geringen Massen und großen zurückziehenden Kräften (bei Ankern mit hoher Eigenschwingungszahl) treten andere Erscheinungen auf.

Die dynamische Wirkung befolgt die Ampèreschen Gesetze: Parallele und gleichgerichtete Ströme ziehen sich gegenseitig an; parallele entgegengerichtete Ströme stoßen sich gegenseitig ab; sich kreuzende Ströme suchen sich parallel und gleichgerichtet einzustellen.

Die Kraftwirkung der Ströme aufeinander ist durch die Umkehr der Pole, wobei sich in beiden einander genäherten Drähten der Strom umkehrt, nicht umkehrbar und bleibt daher auch für Wechselstrom bestehen. Für Wechselstrom gilt ähnliches, wie bei der Weicheisenwirkung: Einander genäherte, gleichzeitig ihre Richtung wechselnde Ströme unterliegen einer großen Anzahl von Kraftimpulsen, die sich bei genügender Masse scheinbar zu einer gleichmäßig konstanten Kraftwirkung zusammensetzen.

§ 18. Die Stromerzeugung und ihre Wechselbeziehung zu den Wirkungen.

A. Beim Fließen eines elektrischen Stromes treten Erscheinungen auf, die alle auf einen Arbeitsvorgang hindeuten:

I. Eine Wärmeentwicklung: Wenn ein Strom durch einen Leiter fließt, werden Wärmemengen frei, die wir auch in Kalorien ausdrücken können. Wärme ist Arbeit (vgl. § 4, 3), also muß sich diese auftretende Wärmemenge auch durch eine bestimmte Anzahl Meterkilogramm ausdrücken lassen.

II. Eine chemische Wirkung: Durchfließt der Strom einen Elektrolyten, so tritt ein chemischer Vorgang auf, der (nach 4, 6) stets mit einem Arbeitsvorgang verbunden ist.

III. Eine magnetische Wirkung: Bei allen Gruppen der magnetischen Wirkungen (IIIa bis IIId, § 15) haben wir es mit mechanischen Arbeiten zu tun, denn überall treten hierbei Kräfte auf, die entgegenstehende Kräfte entlang eines Weges überwinden. Die Magnetnadel überwindet die Kräfte, die vom Erdmagnetismus her an ihr angreifen. Die dynamische Kraftwirkung beschleunigt bei den Versuchen des § 15 den ruhenden Kupferbügel und leistet dadurch Arbeit. Der Elektromagnet mit festem sowohl, wie der mit beweglichem Eisenkern hebt beim Stromschluß Eisenteile gegen die Wirkung der Schwere oder bewegt sie gegen den Einfluß von Federkräften.

B. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Arbeit kann eine mechanische Arbeit, die geleistet wird, nur durch eine mechanische Arbeit von einer Betriebsquelle her geleistet werden; also kann die mechanische Arbeit der Stromwirkungen nur herrühren von einem Arbeitsvorgang, der sich in der Stromquelle abspielt, und zu dem die Arbeit der beobachteten Wirkungen die Gegenarbeit darstellt. Die folgenden Bemerkungen über die Arten der Stromerzeugung sollen zeigen, daß nur unter Aufwendung von mechanischer Arbeit Strom erzeugt werden kann:

I. Mit Hilfe eines Aufwandes von Wärmemengen (Thermoelektrizität)[Hist. 22]: Fig. 7 stellt eine in sich geschlossene Leitung dar, in der sich, wie die Figur andeutet, zwei verschiedene Metalle

(Bsp. Kupfer und Wismut) nebeneinander befinden. Sei das obere Metall Kupfer, das untere Wismut, und sei *n* die Nordspitze einer in ihrer Ruhelage parallel zu dem sie umgebenden Bügel befindlichen Magnetnadel, so erzeugt eine Erwärmung der Lötstelle *I* eine Abweichung der Nordspitze in die Bildebene hinein, also

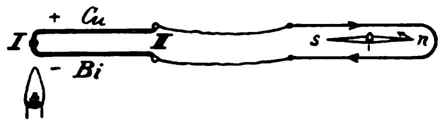


Fig. 7. Schema eines Thermo-Elementes.

einen Strom im eingezeichneten Sinn. Dieser Strom dauert so lange an, als die Lötstelle *I* wärmer ist, als die Verbindungsstellen *II*. Erwärmung von *II* gibt Strom im umgekehrten Sinn; gleichmäßige Erwärmung von *I* und *II* gibt keinen Strom. Die erwärmte Stelle *I* ist Stromquelle, Kupfer bildet in unserem Beispiel den positiven, Wismut den negativen Pol. Die Erfahrung hat gezeigt, daß dann, wenn die Leitung an einer Stelle aufgetrennt wird, also kein Strom fließt, die erwärmte Stelle eine höhere Temperatur annimmt, als bei geschlossenem Stromkreise. Das beweist: es wird tatsächlich eine Wärmemenge, also eine Arbeit für das Zustandekommen des Stromes aufgewendet. Diese Methode ist nicht zur Elektrizitätserzeugung im großen anwendbar, wird vielmehr nur zur Messung hoher Temperaturen benutzt*.

II. Mit Hilfe eines Aufwandes chemischer Energie: Wir schicken zunächst einen Strom durch die in Fig. 8 dargestellte Zelle von *I* nach II; das Gläschen ist mit angesäuertem Wasser gefüllt, die beiden Elektroden bestehen aus Platin. Wir zersetzen durch den Strom das Wasser und erkennen an *II* kleine Wasserstoffbläschen, an *I* kleine Sauerstoffbläschen. Nehmen wir nun durch Lösen der Drähte diese Zelle aus dem Stromkreis heraus, und verbinden wir die beiden Platinplatten durch einen Draht, der um eine Magnetnadel führt, so beobachten wir eine Ablenkung der Nadel, die die Patte *I* als Pluspol, die Platte *II* als Minuspol kennzeichnet. So lange an beiden Platinblechen Wasserstoff und Sauerstoff verteilt ist, dauert die Stromlieferung an. Die Bläschen verschwinden bald, ohne daß sie abfallen, d. h. es entwickelt sich aus ihnen wieder Wasser. Die nach § 4, 6 bei der Vereinigung von Wasserstoff und Sauer-

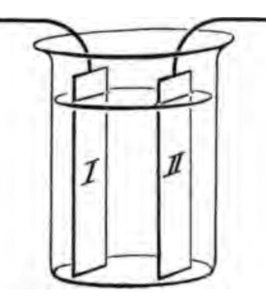


Fig. 8. Elektroden als Schema für ein galvanisches Element.

* Thermoelement von Le Chatelier: Platin und Platinrhodium verträgt bis 1600 Grad (Heraeus, Hanau).

stoff zu Wasser freiwerdende Kalorienzahl erzeugt hier keine Temperaturerhöhung, sondern der ganze Arbeitsvorrat der chemischen Änderung wird in elektrische Energie umgewandelt.

Stromquellen, die aus chemischen Umsätzen ihre Arbeit beziehen, heißen galvanische[Hist. 12]) Elemente. Das hier vorliegende Element (Wasserstoff–Sauerstoff) bedurfte, damit es zur Stromquelle wurde, eines vorherigen Stromdurchganges, denn dadurch wurden die beiden Substanzen, zwischen denen sich der Vorgang abspielte, erzeugt und auf die beiden Elektroden verteilt. Stromquellen dieser Art heißen Sekundär-Elemente. Zu ihnen gehören die in der Technik gebräuchlichen Akkumulatoren.

Es gibt auch Elemente, bei denen ohne vorherigen Stromdurchgang eine chemische Wirkung die Ursache einer Stromabgabe ist: es sind dazu nur zwei stofflich verschiedene Stromleiter mit Abstand in einen beliebigen Elektrolyten zu tauchen. Die beiden Leiter bilden Pole und liefern bei gegenseitiger metallischer Verbindung unter gleichzeitiger Zersetzung der Substanzen des Elementes den Strom. Stromquellen dieser Art heißen Primär-Elemente und bedürfen zu zweckmäßiger Verwendung besonderer Zusammensetzung (s. § 104, I).

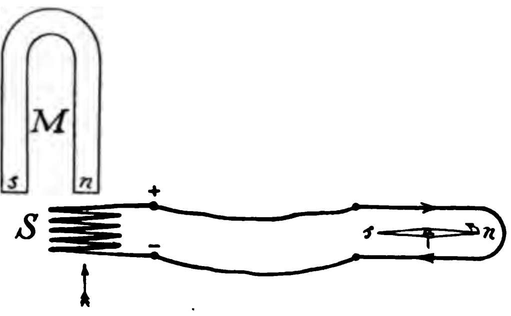


Fig. 9. Schema für die Erzeugung von Elektrizität durch Induktion.

III. Mit Hilfe eines Aufwandes direkter mechanischer Arbeit (Kraft × Weg) unter Anwendung von Magneten: Nach dem Schema der Fig. 9 verbinden wir die Enden der Spule S mit einer Doppelleitung, die an ihrem genügend weit entfernten anderen Ende um eine in ihrer Ruhelage befindliche Magnetnadel herumführt, deren Nordpol bei n liegen möge. Schieben wir die Spule über einen kräftigen Magneten M, etwa in der gezeichneten Anordnung, so erhalten wir einen Ausschlag der Magnetnadel, und zwar bewegt sich ihr Nordpol in die Bildebene hinein, also ist an der Spule oben der Pluspol, unten der Minuspol. Die Stromlieferung dauert so lange an, wie die Verschiebung der Spule über den Schenkel des Magneten dauert. Das Herausziehen der Spule gibt einen umgekehrten Ausschlag. Die Umkehr d s Magneten M (Benutzung des Schenkels s) gibt erneute Umkehr der Stromrichtung gegen die vorigen Fälle. Die Erzeugung eines Stromes mit Hilfe von Magneten heißt die Erzeugung durch Induktion. Sie ist von Faraday[Hist. 26]) entdeckt

worden und ist bisher die einzige im großen bei Anwendung von Maschinen brauchbare Erzeugungsart.

Es hat sich gezeigt, daß bei der Bewegung der Spule Kräfte zu überwinden sind, wenn der Induktionsstrom fließt, und daß die Kräfte nicht auftreten, wenn der Stromkreis unterbrochen ist. Also auch hier ist die in Fig. 9 gezeichnete Einrichtung, die Spule mit dem Magneten, bei der gegenseitigen Bewegung beider Teile als Stromquelle aufzufassen, die mechanische Arbeit in elektrische umsetzt. Ebenfalls wird ein Induktionsstrom erzeugt, wenn ein in einer Spule befindlicher Eisenkern durch irgend eine Ursache, z. B. durch den Strom einer zweiten Spule magnetisiert wird.

Die Gegenüberstellung der Abschnitte A und B dieses Paragraphen zeigt das Auftreten von Arbeitsmengen sowohl bei den Wirkungen des Stromes, als auch bei der Stromerzeugung.

Es handelt sich auch bei der Elektrizität wie bei den übrigen Beispielen des Austausches zwischen den einzelnen Arbeitsformen (§ 5) um die gleiche Gesetzmäßigkeit, daß nämlich die ursächliche Arbeit (der Stromquelle) gleich ist der Summe aller Arbeiten der erzeugten Wirkungen (im Stromkreise).

Es sind sämtliche in der Technik gebrauchte Arbeitsformen in den Wirkungen des Stromes vertreten und es erklärt sich daher die vielseitige und bequeme Verwendbarkeit der Elektrizität.

---

4. Kapitel.

Übersicht über die Anwendungen des elektrischen Stromes.

§ 19. Anwendungen der Stromwärme

(möglich bei Gleichstrom und Wechselstrom).

1. Die Glühlampen.

Sie benutzen die Wärmeentwicklung im stromdurchflossenen festen Leiter zum Zweck der Beleuchtung. Der Stromleiter (Kohle, hitzebeständige Metalle und Oxyde) wird durch den Strom zur Weißglut erhitzt.

2. Die Schmelzsicherungen.

Sie dienen zum Schutz von Stromquellen, Leitungen und Apparaten gegen zu starke Ströme. Ein Metallstreifen, der bei normalem Strom mäßig warm wird, schmilzt oder verbrennt bei zu starkem Strom und unterbricht dadurch den gefährdeten Stromkreis.

3. Elektrische Heizkörper.

Ein fester Leiter nimmt bei Stromdurchgang eine Temperatur an, die geeignet ist einen Raum (z. B. einen Straßenbahnwagen) oder einen

Gebrauchsgegenstand (z. B. Bügeleisen, Kochgefäße, ärztliche Gebrauchsgegenstände) zu heizen.

4. Hitzdraht-Meßinstrumente.

Ein dünner Draht dehnt sich infolge der Stromwärme aus. Durch die Ausdehnung wird ein Zeiger bewegt, nach dessen Ausschlag die Stärke des Stromes beurteilt werden kann.

5. Bogenlampen und Scheinwerfer.

Sie benutzen den Lichtbogen zur Beleuchtung. Es handelt sich bei den Bogenlampen darum, selbsttätig beim ersten Anschließen die Kohlen zur Berührung zu bringen, dann etwas auseinanderzuziehen und während des Abbrennens nachzuschieben (s. w. u. Regelungsvorrichtungen).

6. Elektrische Schweißung.

Metallteile werden durch den Lichtbogen stark erhitzt, dann aneinander gestoßen und verhämmert.

7. Der elektrische Ofen I.

Unter der Wärmewirkung eines Lichtbogens wird ein Schmelzfluß hergestellt oder es werden Materialien zur Erzeugung eines chemischen Vorganges hoch erhitzt. Bei Verwendung von Gleichstrom kommen die Kohlen nicht in Berührung mit dem Schmelzfluß, da eine chemische Wirkung vom Strom her nicht beabsichtigt wird. Bei Wechselstrom können die Kohlen, da die chemische Stromwirkung ausbleibt, in den Schmelzfluß eingetaucht werden. In diesem Fall kann von einem Lichtbogen nicht mehr die Rede sein, vielmehr erhält sich die hohe Temperatur nach dem Vorgang I c in § 15. Ein Ofen, der nur die Stromwärme ausnutzt, wird beispielsweise gebraucht bei der Herstellung von Kalziumkarbid und bei der elektrolytischen Stahlreinigung.

§ 20. Anwendungen der chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes (nur Gleichstrom).

1. Der elektrische Ofen II.

Befinden sich die Elektroden in dem Schmelzfluß, so erhält sich die hohe Temperatur nach dem Vorgang I c in § 15. Aus geeigneten Verbindungen scheidet sich dabei unter Verwendung von Gleichstrom entsprechend dem Vorgang II in § 15 an der Kathode das Metall aus, das somit unmittelbar gewonnen wird. Ein Ofen dieser Art wird beispielsweise bei der Herstellung des Aluminiums verwendet.

2. Die Galvanoplastik.

Aus wäßrigen Lösungen von Salzen setzt sich das Metall bei geeigneter Stromstärke und geeigneter Zusammensetzung des Bades, sowie nach sorgfältiger Reinigung der Kathode sehr dicht und sauber an die letztere an, so daß man:

a) billige Metalle mit besseren überziehen kann (Verkupfern, Vernickeln, Versilbern, Vergolden, Platinieren) oder
b) fein bearbeitete Gegenstände durch zweimaliges Abziehen vervielfältigen kann (Kopieren von Kunstgegenständen und Anfertigen von Klischees [Galvanos] für Druckereizwecke).

3. Die Kupferraffination.

Langsam (mit schwachem Strom) ausgeschiedenes Kupfer ist seiner chemischen Beschaffenheit nach sehr rein herstellbar. Die Unreinigkeiten der sich auflösenden Kupferanode (Hüttenkupfer) lösen sich oder fallen zu Boden des Gefäßes. Rohes Kupfer enthält vor allem Schwefel und Arsen, Stoffe, die beide für technisches Kupfer unzulässig sind. Ebenfalls machen bereits geringe Zusätze von Mangan das Kupfer für Leitungszwecke unbrauchbar. Durch die Elektrolyse gereinigtes (raffiniertes) Kupfer (elektrolytisches Kupfer) findet in der Elektrotechnik für Leitungen weitgehende Verwendung.

4. Die Akkumulatoren.

Akkumulatoren sind Einrichtungen, bei denen die Elektroden und die Flüssigkeiten durch den Stromdurchgang in haltbarer Weise chemisch verändert werden; durch diese chemische Veränderung wird die Einrichtung (entspr. dem Vorgang § 18, B II) selbst für eine Zeitlang eine Stromquelle. Bei der Stromabgabe werden die veränderten Materialien zu ihrem Ausgangszustand zurückgeführt. Das Verhalten ist einer Stromaufspeicherung gleichwertig anzusehen. Der erste Vorgang (die Stromaufnahme) heißt die Ladung, der zweite (die Stromabgabe) die Entladung des Akkumulators.

5. Die Voltameter zu Meßzwecken.

Diejenigen Apparate, mit denen man mit Hilfe der in § 17, II angeführten Gesetzmäßigkeit aus der Menge der Ausscheidungsprodukte (aus Metallniederschlägen, sowie aus Wasserstoff und Knallgas) Stromstärken bestimmt, heißen Voltameter[Hist. 18]) (Silber-, Kupfer-, Wasservoltameter).

6. Polreagenzpapier.

Zwecks Erkennung der Pole (z. B. beim Anschluß von Bogenlampen und in der Galvanoplastik) verwendet man mit besonderen Mitteln getränkte Papiere. Diese Papiere werden durch Befeuchtung stromleitend und erzeugen bei Stromdurchgang an einem Pol einen Farbstoff. Die meisten, und zwar mit Phenolphthaleïn arbeitenden Papiere erzeugen am negativen Pol einen roten Fleck. Beim Gebrauch dieser Papiere legt man den befeuchteten Streifen auf Isoliermaterial und drückt die Leitungsenden unter Vermeidung ihrer gegenseitigen Berührung darauf. An Betriebsleitungen wird zweckmäßig eine zur Anlage gehörige Glühlampe dem Streifen vorgeschaltet.

§ 21. Anwendungen des Elektromagnetismus in der Schwachstromtechnik.

1. Der Wagnersche Hammer.

Fig. 10 stellt einen Elektromagneten dar, dessen Anker *A* an einem federnden Metallstreifen befestigt ist. Der Anker trägt einen, meistens wiederum an einer Feder befestigten Platinkontakt, der gegen eine feststehende, durch Schraube einstellbare Platinspitze gedrückt wird. Dieser Kontakt liegt in einem Stromkreise mit den Windungen des Elektromagneten. Legt man eine Stromquelle an die in Fig. 10

mit 1 und 2 bezeichneten Drahtenden, so wird zunächst der Magnet erregt. Die magnetischen Kräfte beschleunigen den Anker, und von einer bestimmten Ankerstellung ab wird der Strom an dem Platinkontakt unterbrochen; die magnetischen Kräfte verschwinden in diesem Augenblick, und die Federkräfte treiben den Anker zurück, bis der Strom nach erneuter Berührung der Platinkontakte von neuem anziehend auf den Anker wirkt. Das Spiel des Ankers wiederholt sich, solange die Stromquelle angeschlossen ist, fortwährend. Diese Einrichtung, der Wagnersche Hammer, findet Verwendung als selbsttätiger Unterbrecher und bei der elektrischen Glocke.

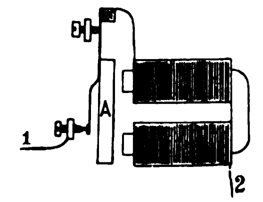


Fig. 10. Wagnerscher Hammer.

2. Die elektrische Glocke.

Sie beruht auf dem Wagnerschen Hammer. Wir befestigen an dem Anker einen Klöppel und lassen ihn bei seiner hin- und hergehenden Bewegung gegen eine Glocke schlagen. Bei der Ausführung der Glocke befestigt man alles an einem eisernen, bügelförmigen, in Fig. 11 angedeuteten Gerüst, da Holz beim Schwinden zu Verschiebungen zwischen den einzelnen Teilen Anlaß geben würde. Es wird dadurch ein Futter aus Isoliermaterial (Vulkanfiber) an der Stellschraube nötig. Kleine, aus den Magnetpolen hervorragende Messingstifte verhindern ein „Kleben" des Ankers. Eine Stromquelle, meistens ein galvanisches Element, wird mit einer Leitung, die einen einfachen federnden Ausschalter (Drücker, Druckknopf) enthält, an die Klemmen der Glocke (1 und 2 in Fig. 11) gelegt. Hintereinander geschaltete Druckknöpfe müssen alle gedrückt werden, wenn die Glocke ein Signal geben soll. Nebeneinander geschaltete Drücker ermöglichen den Gebrauch von beliebig vielen Stellen aus. Wird von jedem der nebeneinander geschalteten Drücker die Leitung bis in die Nähe der Glocke geführt, so können in den einzelnen Leitungen befindliche Magnetspulen Fallnummern auslösen, die durch ihr Sichtbarwerden den Ausgangspunkt des Zeichens an der Empfangsstelle angeben (Tableau).

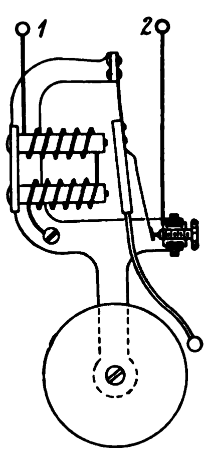


Fig. 11. Schema einer elektrischen Schelle.

3. Der Morse-Telegraph Hist. 28).

An der einen Station wird ein Stromkreis geschlossen, in dem sich an einer zweiten Station ein Elektromagnet befindet. Bei Stromschluß wird der Anker des Elektromagneten angezogen, und an seiner Bewegung nimmt ein Hebel, der Schreibhebel, teil. Wird der Stromkreis unterbrochen, so bewegt sich der Schreibhebel durch Federkraft zurück. An dem Schreibhebel ist ein Stiftchen oder ein Farbrädchen

angebracht, das auf einem an ihm vorbeigezogenen Papierstreifen Zeich
hinterläßt. Ein kurz andauernder Strom erzeugt einen Punkt, ein etw
länger andauernder Strom einen Strich. Aus Strichen und Punkt
ist ein Alphabet, das Morsealphabet, zusammengesetzt, so daß dadur
die Verständigung möglich ist. Die Station, an der eine Nachric
abgegeben wird, heißt die Geberstation, diejenige, an der die Nachric
eintrifft, die Empfängerstation.

Durch Anwendung der Morseschaltung, Fig. 12, kann unter A
wendung nur eines Leitungsdrahtes, wobei die Erde als Rückleitung Hist.

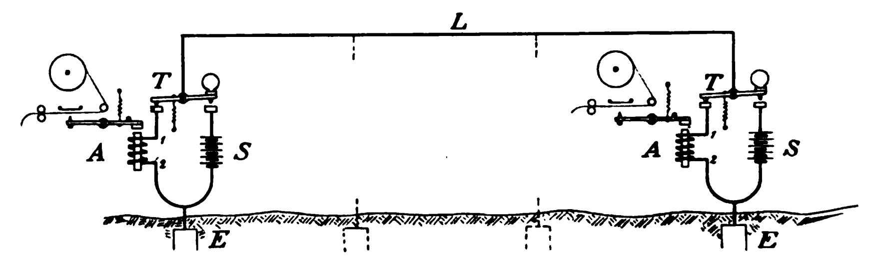


Fig. 12. Morseschaltung.
L = Leitung, A = Apparatspule, T = Taste, S = Stromquelle (Batterie), E = Erdplatt

dient, jede Station sowohl Geber als auch Empfänger sein. Sind vollständig gleich eingerichtete Stationen an beliebigen Stellen zwischen den beiden Endstationen (Andeutung in Fig. 12 durch gerissene Linien) an dieselbe Leitung gelegt, so ist der Verkehr von jeder zu jeder Station dieser Morselinie möglich. Es klappern beim Telegraphieren alle Apparate mit. Durch vereinbarte, aus dem Klappern erkennbare Anrufzeichen macht man die Empfängerstation aufmerksam. Bei Anwendung vieler Stationen kommt auf jede einzelne nur ein geringer Bruchteil* des Stromes der Geberstation; dadurch werden die Ströme für den Schreibhebel zu schwach, und es tritt in der Morseschaltung an Stelle des Apparates das Relais.

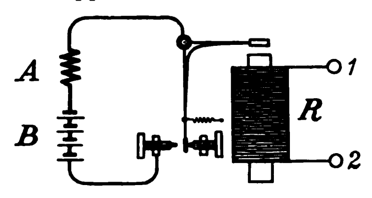


Fig. 13. Schema des Relais mit dem Lokalstromkreis.
R = Relaisspule, A = Apparatspule, B = Batterie des Ortsstromkreises (Lokalbatterie).

Das Relais. Ein Elektromagnet R mit vielen dünnen Windungen zieht einen leichten, leicht beweglichen Hebel an, der einen stärkeren Strom (Ortsstromkreis) von der Ortsbatterie aus schließt, der den Schreibhebel in Bewegung setzt. Die Vereinigung des in Fig. 13 gezeichneten Relais mit der Morseschaltung geschieht durch Anschließen der Klemmen 1 und 2 an die gleichbenannten Stellen der Fig. 12 und führt zum Arbeitsstrom-Ver-

* Vgl. § 34 über die Stromverzweigungen.

fahren (es fließt Strom in der Leitung, während man ein Zeichen gibt). Beim Ruhestrom-Verfahren fließt Strom in der Leitung, während man nicht arbeitet, und man gibt Zeichen, indem man diesen Strom gemäß dem Morsealphabet unterbricht. Der Vorteil dieser Einrichtung liegt darin, daß man über den brauchbaren Zustand der Leitung (Glockensignal) stets unterrichtet ist, der Nachteil darin, daß die Fernbatterie infolge der andauernden Stromlieferung größere Kosten verursacht.

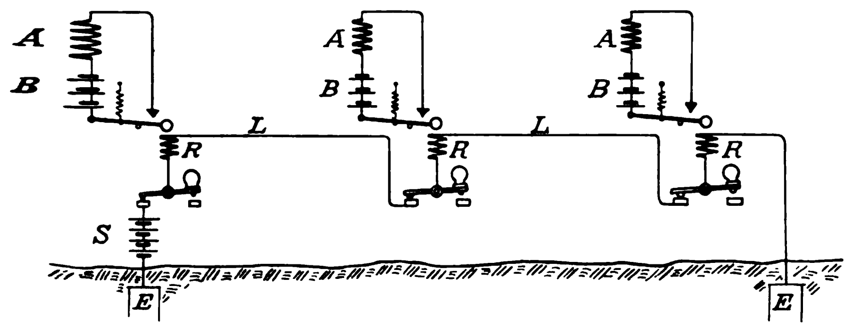


Fig. 14. Schema für eine Ruhestromlinie.

Fig. 14 zeigt ein Schema für Ruhestromanlagen mit Relais bei Anwendung von drei Stationen.

4. Die Mikrophon-Telephon (Hist. 43, 44, 45)-Übertragung.

Die Schallwellen der Luft treffen eine Membran M_1 in Fig. 15, hinter der ein Kohlekontakt angebracht ist (Mikrophon, Geberstation). Kohle läßt bei verschiedenem Anpressungsdruck Ströme von verschiedener Stärke hindurch. Die Geberstation entsendet daher bei schwingender Membran Ströme, die in der zeitlichen Aufeinanderfolge der Schwingungen stärker und schwächer werden. An der Empfängerstation

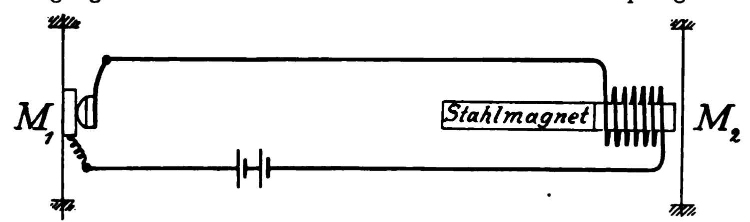


Fig. 15. Schema einer Mikrophon-Telephon-Übertragung.

werden diese periodisch veränderlichen Ströme durch die Spule eines Elektromagneten geschickt, der durch einen Stahlmagneten unterstützt wird und eine eiserne Membran M_2 in derselben Weise in Schwingungen versetzt, wie sie die Geberstation liefert (Empfänger, Telephon).

Für eine doppelseitige Übertragung mit kurzer Leitung kommt bei Batterieanruf das folgende Schema Fig. 16 in Frage:

Das Telephon hängt, damit der Anruf erfolgen kann, an dem

Haken des Umschalters U_1; der Druck zum Schellensignal erfolgt a— einem zweiten Umschalter U_2.

Bei längeren Leitungen wendet man Induktionsspulen an, dere= Zweck es ist, die Leitungsverluste (s. § 38, C und § 67, 7. Versuc= zu verringern und die Wirksamkeit zu erhöhen.

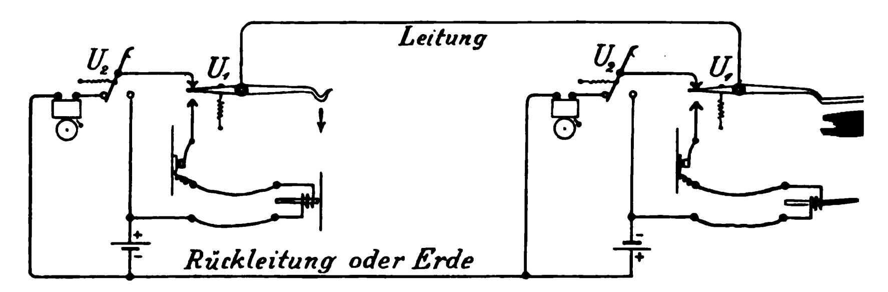


Fig. 16. Schema einer zweiseitigen Mikrophon-Telephon-Anlage (ohne Induktionsspulen) mit Batterie-Anruf.

5. Elektrische Zeigerwerke (sympathische Uhren).

Der Gedanke, von einer Zentraluhr aus auf eine Reihe von Stationen die Zeitangabe auf elektrischem Wege zu übertragen, ist erst brauchbar geworden, seitdem man Stromstöße von Minute zu Minute in abwechselnder Richtung schickt, denn ohne diesen Kunstgriff werden die Zeigerwerke von atmosphärischer Elektrizität her sehr leicht beeinflußt. Die Zeigerwerke der Nebenuhren sind so eingerichtet, daß sie nur bei Strömen wechselnder Richtung springen, während sie bei einer Reihe von Stromstößen der gleichen Richtung stehen bleiben.* Man erreicht das durch Anwendung polarisierter Anker. Nach Fig. 17 sei ein gerader Stahlmagnet zwischen den Polen eines Elektromagneten um einen beiderseits begrenzten Winkel drehbar. Ist der Elektromagnet links nord-, rechts südmagnetisch, so wird der nach unten zeigende Nordpol des drehbaren Teiles nach rechts gezogen. Tritt ein Stromstoß in umgekehrter Richtung auf, so bewegt sich der Nordpol wieder nach links. Stromstöße der gleichen Richtung in unmittelbarer Aufeinanderfolge verändern seine Lage nicht. Entsteht innerhalb einer Minute von der Atmosphäre her ein dem letzten regelrechten entgegengerichteter Stromstoß, so erfolgt zwar die Bewegung des Ankers zu früh, der Anker bleibt aber stehen, wenn der nächste regelrechte Stromstoß

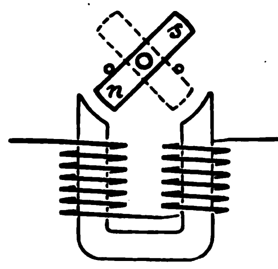


Fig. 17. Schema für die Bewegung eines polarisierten Ankers.

* Atmosphärische Einflüsse entgegengesetzter Polarität kommen in kurzen Zeitabständen nicht vor.

von der Zentraluhr herkommt. Erst mit dem übernächsten regelrechten Stromstoß setzt sich die Bewegung fort.

Die hin- und hergehende Bewegung des Magneten erzeugt durch Anwendung besonderer Mechanismen eine fortschreitende Bewegung der Zeiger. Es gibt außer der hier angedeuteten Anordnung auch Zeigerwerke mit polarisiertem Anker von fortschreitender Drehbewegung.

6. Elektrische Auslösung von Signalen.

Zu demselben Zwecke wie bei den Nebenuhren, nämlich zur Vermeidung von Störungen durch die Atmosphäre, verwendet man beim Auslösen von Signalwerken (Streckensignalen bei Bahnen usw.) Stromstöße wechselnder Richtung, die einen polarisierten Anker in Schwingung versetzen und erst nach mehreren Schwingungen den Mechanismus des Signales freigeben.

§ 22. Anwendungen des Elektromagnetismus in der Starkstromtechnik.

1. Die Elektromotoren.

Elektromotoren sind Betriebsmaschinen, die von einer Stromquelle aus durch Gleichstrom oder Wechselstrom ihre Arbeit beziehen. Die bei ihnen auftretenden Kräfte sind elektromagnetische Kräfte. Elektromotoren finden hauptsächlich Verwendung zum Betrieb von Werkstätten, Fabriksälen, Pumpen, Fahrzeugen und Hebemaschinen.

2. Lastmagnete.

Ein großer Elektromagnet wird auf eine sonst schwer zu fassende eiserne Last aufgesetzt zum Zweck des Hebens und Transportierens dieser Last mit einem Kran. Ist die Last an ihrem Bestimmungsort angelangt, so wird der Elektromagnet stromlos gemacht und abgehoben. Elektromagnete dieser Art können bei Verwendung von Gleichstrom für beliebig große vorkommende Lasten ausgeführt werden, so daß ihr Eigengewicht immerhin klein gegen das Gewicht der Last ist.

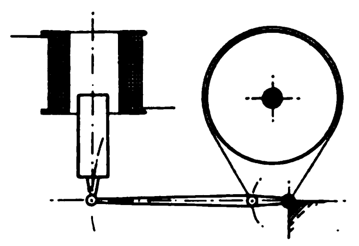


Fig. 18. Schema einer Lösungsbremse.

3. Lüftungsbremsen.

Bei elektrisch betriebenen Hebezeugen läge ohne weiteres die Gefahr nahe, daß der Strom während des Betriebes ausbliebe, vielleicht infolge des Durchschmelzens einer Sicherung in der Zuleitung oder durch eine sonstige Störung. Die Last würde in einem solchen Falle, wenn keine Selbsthemmung vorhanden ist, beim Verschwinden der Betriebskraft stürzen. Eine Sicherheitseinrichtung wird hier durch die Anwendung einer Lösungs- oder Lüftungsbremse gewonnen. Ein Eisenkern (vgl. Fig. 18) zieht bei unterbrochenem Strom ein Bremsband, das um eine zum Triebwerk gehörige Scheibe gelegt ist, durch sein Eigengewicht fest und läßt jede vorkommende Last schweben. Nur solange der Motor

läuft, wird der Eisenkern durch eine über ihm befindliche, mit dem Motor zugleich eingeschaltete Stromspule hochgezogen, so daß während des Betriebes das Bremsband gelüftet ist. Bleibt der Strom durch einen Zufall aus, so fällt die Bremse ein. Sie dient zugleich zum schnelleren Anhalten der Last am Bestimmungsort. Zum schnelleren Anhalten von Triebwerken finden Bremsen dieser Art auch bei anderen Maschinen (z. B. bei elektrisch betriebenen Webstühlen) Verwendung. Elektrische Lüftungsbremsen können für Gleichstrom und für Wechselstrom hergestellt werden.

4. Regelungsvorrichtungen für Bogenlampen.

Die unter § 19, 5 angegebenen Bewegungen der Kohlen von Bogenlampen werden durch elektromagnetische Kräfte hervorgerufen oder ausgelöst und angehalten. Die Lampen mit den Regelungsvorrichtungen dieser Art können sowohl für Gleichstrom, wie auch für Wechselstrom eingerichtet sein.

5. Starkstrom- und Schwachstrom-Ausschalter (Maximal- und Minimalautomaten).

Der Hebel (das Messer) eines Ausschalters wird durch Federkraft zurückgezogen, wenn er durch Vermittlung eines Elektromagneten frei-

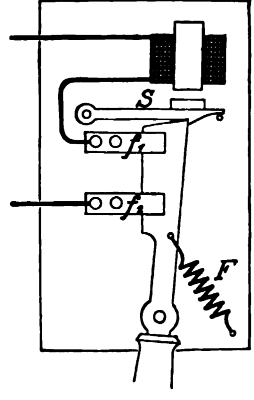


Fig. 19. Maximalautomat (Schema).

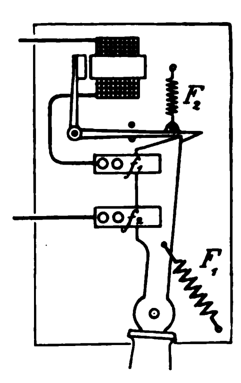


Fig. 20. Minimalautomat (Schema).

gegeben wird. Hat die Freigabe bei zu starkem Strom zu erfolgen, so entsteht ein Maximalautomat (Fig. 19), oder bei zu schwachem Strom, bzw. bei Stromlosigkeit, so entsteht ein Minimalautomat (Fig. 20). Beide Automaten sind Sicherheitseinrichtungen. Ersterem fällt dieselbe Aufgabe zu, wie einer Schmelzsicherung; die Verwendung des letzteren wird in späteren Kapiteln erläutert.* Da es sich hier um die Anwendung der magnetischen Kräfte zwischen weichem Eisen handelt, sind diese Einrichtungen bei Gleichstrom und Wechselstrom anwendbar.

---

* Ladung von Akkumulatoren (§ 107), Bogenlampen in Reihe (§ 54 C), Nebenschlußmotoren mit Minimal-Abschaltung (§ 93 B).

6. Stromrichtungszeiger.

Eine in einem Gehäuse untergebrachte Magnetnadel zeigt durch Rechts- oder Linksausschlag die Stromrichtung an. Man benutzt dieses Hilfsmittel hauptsächlich in Akkumulatorenleitungen zur Unterscheidung von Ladung und Entladung.

7. Meßinstrumente mit Stahlmagnet.

Je nach der Größe der Kraftwirkung zwischen Strom und Stahlmagnet wird unter Verwendung einer geeigneten Gegenkraft (Feder) ein Zeiger bewegt, nach dessen Ausschlag man die Stärke des Stromes bestimmen kann. Instrumente dieser Art sind nur für Gleichstrom anwendbar.

8. Meßinstrumente mit Spulen ohne Eisen.

Durch die Kraftwirkung der Ströme aufeinander werden entweder Zeiger oder umlaufende oder schwingende Teile bewegt, nach deren Bewegung man die Ströme selbst oder den Stromverbrauch für bestimmte Zeitabschnitte feststellt. Im ersten Falle handelt es sich um Strommesser, im zweiten um Zähler. Die verwendete Wirkung gestattet den Gebrauch solcher Instrumente für Gleichstrom und Wechselstrom.

9. Meßinstrumente mit Weicheisenkern.

Setzt man einen leichten Weicheisenkern der Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule (Gleichstrom oder Wechselstrom) aus, und sorgt man für eine zuverlässige Gegenkraft ohne Erzeugung von viel Reibung, z. B. durch Anwendung einer Feder, so kann man aus der Stellung des Eisens einen Schluß auf die Stromstärke ziehen. Man überträgt vielfach die Bewegung auf einen drehbaren Zeiger.

---

5. Kapitel.

Die Gesetze des elektrischen Gleichstromes.

§ 23. Das Maß für die Stromstärke (Ampere).

Die in § 15 beschriebenen Versuche haben gezeigt, daß in einem Stromlauf zugleich mit einer Wirkung auch die übrigen stärker oder schwächer werden, wenn wir entsprechende Änderungen an dem Stromkreis vornehmen. Es wäre denkbar, die Stromstärke nach jeder beliebigen dieser Wirkungen zu bemessen dadurch, daß ein bestimmter Apparat und die meßbare Wirkung dieses Apparates zur Norm erhoben wird. Das hätte aber den Nachteil, daß man von sehr vielen Einzelheiten abhängig sein würde. In § 20, 5 sind als Voltameter Einrichtungen angedeutet worden, die von Nebeneinflüssen praktisch frei sind, und bei denen die erzeugten chemischen Wirkungen einer ganz bestimmten, einfachen Gesetzmäßigkeit unterliegen: Das durch den Strom entwickelte Gewicht eines beliebigen Ausscheidungsproduktes ist proportional zum Gewicht jedes anderen

in demselben Stromkreise und in derselben Zeit entwickelten Ausscheidungsproduktes und bei verschiedener Dauer der Versuche außerdem proportional zur Zeit des Stromdurchganges. Diese bequeme Gesetzmäßigkeit hat dazu geführt, die Stromstärke den chemischen Wirkungen proportional zu bemessen. Nach dem Reichsgesetz vom Juli 1898 wird in Übereinstimmung mit der Wissenschaft und der Bezeichnungsweise der übrigen Nationen die Einheit der elektrischen Stromstärke dargestellt durch den unveränderlichen elektrischen Strom, welcher bei dem Durchgange durch eine wäßrige Lösung von Silbernitrat in einer Sekunde 0,001118 g Silber niederschlägt. Zu Ehren des bereits erwähnten französischen Forschers Ampère heißt diese Einheit der Stromstärke „1 Ampere".* Mit dieser gesetzlichen Festlegung stimmt praktisch genügend genau überein, daß 1 Ampere in einer Minute 19,76 mg Kupfer ausscheidet (s. § 17, II).

Beispiel. Ein Strom scheidet in 30 Minuten 0 Sekunden ein Kupfergewicht von 4,50 g aus. Wie stark ist der Strom?

In der Minute scheidet der Strom aus:

$$\frac{4{,}50_{g}}{30_{Min.}} = 0{,}150 \text{ g/Min.} = 150 \text{ mg/Min.}$$

Daher beträgt die Stromstärke:

$$\frac{150}{19{,}76} = 7{,}591 \text{ Ampere.}$$

§ 24. Der Begriff des Strommessers.

Bei größerer Stromstärke wird ein Eisenkern, der an einer Feder aufgehängt ist, tiefer in eine Spule hineingezogen, als bei geringerer Stromstärke. Man kann einen solchen Apparat mit einem Voltameter in einen Stromkreis schalten, so wie es Fig. 21 angibt. Man befestigt einen Zeiger an dem Eisenkern und macht einen Strich auf eine darunter befindliche Skala dorthin, wo der Zeiger sich einstellt. Der Strom wird während des Versuches konstant gehalten. Die Dauer des Stromdurchganges wird scharf beobachtet. Dann berechnet man auf

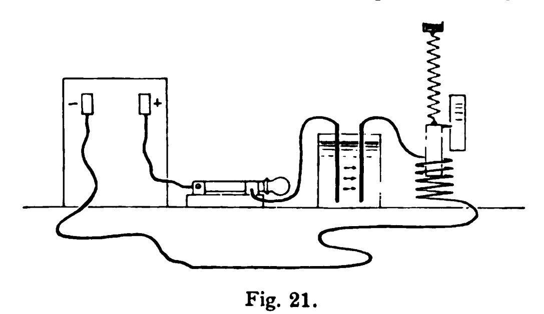


Fig. 21.

* Die Zahl 0,001118 erscheint willkürlich. Die Behandlung des absoluten Maßsystems (§ 68, J) gibt weiteren Aufschluß.

die in § 23 angegebene Weise die Stromstärke aus dem Gewicht des ausgeschiedenen Kupfers, das durch Wägung der Kathode vor und nach dem Versuch erhalten wird, und schreibt die Zahl der Ampere an den Strich. Das wird mehrmals für verschiedene Stromstärken wiederholt und wir erhalten auf diese Weise ein Meßinstrument, dem wir von nun ab den Namen Strommesser (Amperemeter) geben.

§ 25. Vorbereitende Versuche an einer Wasserleitung.

Auf dem Versuchstisch steht ein Gestell, an dem bald höher, bald tiefer ein Glastrichter eingespannt werden kann. An den Trichter schließt sich ein Gummischlauch, der zu einem geraden, dünnen Glasrohr führt, das wagerecht eingespannt ist. Unter diesem Glasrohr befindet sich ein Becken. Die ganze Anordnung zeigt Fig. 22. Der Trichter ist mit Wasser gefüllt und das Wasser läuft während einer kurzen Versuchsdauer nach Öffnen eines Quetschhahnes am Ende des Glasrohres ab in ein Meßglas, das in das Becken gestellt wird. Während des Versuches schöpfen wir aus dem Becken stets so viel Wasser zu, daß der Spiegel

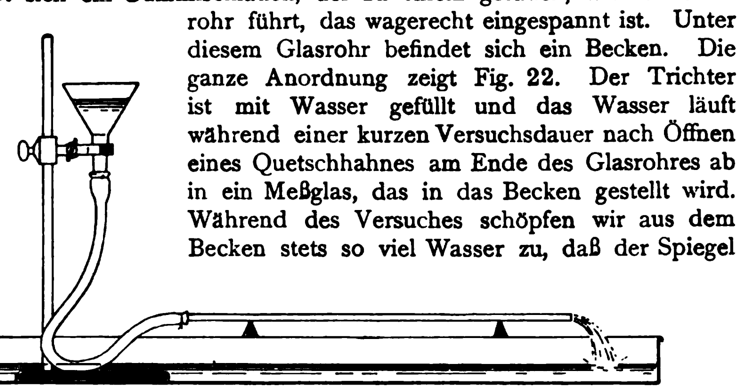


Fig. 22. Versuchsanordnung.

im Trichter derselbe bleibt. Wir beobachten die Ausflußmenge für bestimmte Zeit unter verschiedenen Spiegelhöhen, von der Höhe des Rohres aus gerechnet, und ermitteln daraus die Wassermenge/Sekunde. Als Ergebnisse erhalten wir in unserem besonderen Falle unter Anwendung drei verschiedener Rohre:

Ergebnisse unter Anwendung der	ein-	zwei-	dreifachen Druckhöhe
I. Enges kurzes Rohr	11	17	21 ccm/Sek.
II. Rohr, genau so eng, doppelter Länge	10	14	17 „ „
III. Rohr weiter, Länge wie II . . .	20	30	38 „ „

Durch diese Versuche werden folgende drei Lehrsätze erläutert:

A. Bei einer und derselben Rohrleitung ist die Wassermenge/Sekunde um so größer, je größer die Druckhöhe zwischen Abflußöffnung und Oberwasserspiegel ist.

B. Die Anwendung größerer Rohrweite gibt, wenn alles andere gleich bleibt, mehr Wassermenge/Sekunde.

C. Durch Verlängerung der Rohrleitung bekommt man, wenn alles andere gleich bleibt, weniger Wassermenge/Sekunde.

Diese Erscheinungen sind so zu erklären, daß das Wasser in dem Rohre einen Reibungswiderstand findet, der bei kurzen weiten Rohren gering, bei langen engen Rohren groß ist.

§ 26. Vorbereitende Versuche an einer elektrischen Leitung.

Auf dem Versuchstisch steht eine Einrichtung, die in Fig. 23 angedeutet ist. S_1, S_2 und S_3 bedeuten drei hintereinander geschaltete Stromquellen (Akkumulatoren). Vom Pluspol von S_1 aus führt eine kurze

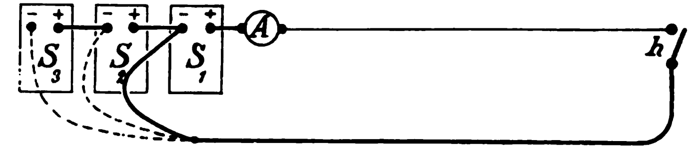


Fig. 23. Versuchsanordnung.

dicke Kupferleitung zu dem Strommesser A, und von diesem aus ein Draht, der gegen andere Drähte desselben Materials (Nickelin) auswechselbar ist, zu einem Hebelschalter h. Von letzterem aus kann eine dicke Kupferleitung zu dem Minuspol von S_1, S_2 oder S_3 gelegt werden. Wir beobachten nach Einschalten von h (für kurze Versuchsdauer, da sonst die entwickelte Wärme des Drahtes stört) unter Verwendung verschiedener Drähte des gleichen Materiales und unter Verwendung verschiedener Anzahl von Stromquellen die Stromstärke (als Ablesung an A) und finden in diesem Falle:

Ergebnisse unter Anwendung von	1	2	3	hint. gesch. Stromquellen
I. Dünner kurzer Draht	3,8	7,6	11,4	Ampere
II. Draht, genau so dünn, doppelter Länge	1,9	3,8	5,7	„
III. Draht dreifachen Querschnittes, gleicher Länge wie II	5,7	11,4	17,1	„ *

Diese Versuche lehren:

A. Bei Anwendung eines und desselben Drahtes erhalten wir die Stromstärke in demselben Maße größer, wie die Zahl der hintereinander geschalteten Stromquellen vermehrt wurde.

B. Durch Wahl eines größeren Drahtquerschnittes bekommen wir, wenn alles andere gleich bleibt, eine zur Querschnittsvergrößerung proportional vermehrte Stromstärke.

C. Bei Verwendung verschiedener Drahtlängen erhalten wir, wenn alles andere gleich bleibt, die Stromstärke umgekehrt proportional zur Länge.

* Die Genauigkeit, mit der wir diese Einstellungen des Strommessers bekommen, soll für die vorläufigen Betrachtungen genügen.

§ 27. Vergleich der Versuche mit Wasser und Elektrizität; der Begriff der Spannung und des Spannungsmessers; die Einheit der Spannung.

In beiden Fällen, bei Wasser und bei Elektrizität, handelt es sich um eine Strömungserscheinung, die sich in einem bestimmten Kreislauf abspielt. (Wasser: vom Trichter durch das Rohr zum Becken und zum Trichter zurückgehoben. Elektrizität: vom Pluspol durch die Leitung zum Minuspol und in der Stromquelle zum Pluspol zurück.) Die strömenden Mengen durchfließen in beiden Fällen die Querschnitte des gegebenen Stromweges (Wasser den Rohrquerschnitt, Elektrizität den Drahtquerschnitt). Da sich an keiner Stelle der Leitung etwas ansammelt und da nirgendwo etwas entweicht, sind die verschiedenen Querschnitte eines und desselben Kreislaufes in der gleichen Zeit von den gleichen Mengen durchflossen. Es entsprechen sich gegenseitig die Wasserstromstärke (Wassermenge/Sekunde, ccm/Sek.) und die elektrische Stromstärke (Elektrizitätsmenge/Sekunde, Ampere). Der Vergleich lehrt weiter, daß wir durch Hintereinanderschaltung von Stromquellen an einem elektrischen Kreise etwas ändern, was der Druckhöhe über der Ausflußöffnung bei Wasser entspricht; es bringt jede Einzelstromquelle die am Minuspol in sie eintretende Elektrizität auf ein um eine Stufe erhöhtes Potential. Die von den Stromquellen gelieferte Potentialdifferenz führt den Namen der elektromotorischen Kraft. Sie steigt in demselben Maße wie die Zahl der gleichartigen hintereinander geschalteten Stromquellen. Zwischen den Polen ist ein Bestreben des Ausgleiches vorhanden und nur dadurch wird der Ausgleich in Grenzen gehalten, daß die Elektrizität bei ihrem Kreislauf Widerstände vorfindet, wie das Wasser im Rohre, d. h. Widerstände, die durch Länge und Querschnitt, und wie spätere Versuche zeigen werden, auch durch das Material des Stromweges vorgeschrieben sind. Infolge ihrer elektromotorischen Kraft stellt die Stromquelle erstens zwischen ihren Polen Spannung her, und zweitens sorgt sie bei geschlossenem Kreise für eine dauerende Stromlieferung, wobei auch während dieses Ausgleichsvorganges vermöge ihrer inneren Vorgänge elektromotorische Kräfte aufrecht erhalten werden und Spannungen zwischen beliebigen Stellen des Schließungskreises auftreten. In ihrer Stromlieferung unterscheiden sich technische Stromquellen von elektrisch geladenen Körpern (etwa einer Leydner Flasche), indem bei letzteren durch den Ausgleichsvorgang die Spannung schwindet, wie die Druckhöhe bei Wasser schwindet, wenn man etwa die Anordnung nach Fig. 22 einfach auslaufen läßt. Ein Pumpwerk, das das ausfließende Wasser vom Becken aus auf einem zweiten Wege gleichmäßig in den Trichter zurückbefördert, wäre mit der technischen Stromquelle vergleichbar.

Der Begriff der Spannung (Potentialdifferenz) ist doppeldeutig, indem erstens treibende Spannungen (elektromotorische Kräfte) und zweitens Potentialabfälle zu unterscheiden sind, die infolge des Strö-

mungsvorganges der Elektrizität durch einen Leiter zwischen seinen Enden hervorgerufen werden. Sie stehen in einem Verhältnis, wie Gewinn und Verlust, wie Einnahme und Ausgabe im Geldverkehr, die beide in Mark gemessen werden. Auch die Elektrotechnik mißt beide begrifflich verschiedene Größen der Spannung nach demselben Maß, ja es hat sich sogar unzweckmäßigerweise* herausgebildet, diese begrifflich verschiedenen Größen in den Formeln durch einen und denselben Buchstaben E oder e zu bezeichnen.

Die Spannung kann mit Apparaten gemessen werden, in denen der Strom einen sehr langen und sehr dünnen Draht zu durchfließen hat. Die Stromstärke bleibt in diesem Apparat sehr gering, wie aus den Versuchen des § 26 gefolgert werden kann, auch wenn man ihn unmittelbar an die Klemmen einer großen Anzahl hintereinander geschalteter Einzelstromquellen legt. Der schwache Strom bleibt dabei stets proportional zur angelegten Spannung, und mit ihm mißt man die letztere, unter Zuhilfenahme der Stromwirkungen.** Die Einheit der Spannung heißt zu Ehren des bereits erwähnten Physikers Volta „1 Volt", deren Festlegung später erläutert wird. Die Spannungsmesser erhalten eine Voltskala, zu deren angenäherter Vorstellung hier nur erwähnt sein soll, daß die bei den bisherigen Versuchen verwendeten Akkumulatoren angenähert 2 Volt auf die Zelle besitzen. Die Spannungsmesser (Voltmeter) werden stets zwischen zwei Punkte eines

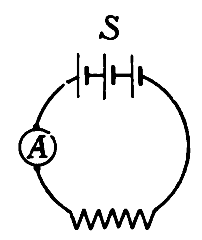


Fig. 24. Stromkreis mit Strommesser.

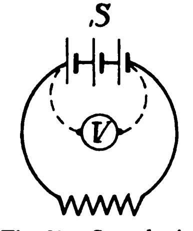


Fig. 25. Stromkreis mit Spannungsmesser.

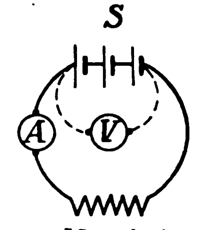


Fig. 26. Stromkreis mit Strom- und Spannungsmesser.

Stromkreises gelegt, während ein Strommesser in den Querschnitt des Stromweges eingeschaltet wird. Diese Schaltungsweisen der Instrumente verdeutlichen die Figuren 24 bis 26, wobei S die Stromquelle, A den Strommesser und V den Spannungsmesser bedeutet. Der Spannungsmesser liegt in den Figuren 25 und 26 an den Polen der Batterie, während andere Schaltungsweise auch andere Einstellung zur Folge

* Da das allgemein üblich ist, ist auch in diesem Lehrbuch hiervon Gebrauch gemacht worden.

** In besonderen Fällen wendet man auch Spannungsmesser an, die mit der Kraftwirkung zwischen elektrisch geladenen Körpern arbeiten, welche ihre Ladung von den Polen der Stromquellen erhalten. Hierher gehören die (stets stromlos arbeitenden) Elektrometer, deren Abarten in der Technik als elektrostatische Spannungsmesser bezeichnet werden.

haben würde. Für die Einstellung des Strommessers ist es gleichgültig, an welcher Stelle eines Stromkreises er sich befindet.

§ 28. Weitere Versuche an einer Wasserleitung.

Es liege eine Wasserleitung vor ähnlich wie in § 25, nur mit dem Unterschied, daß das wagerechte Rohr aus mehreren Stücken gleichen Durchmessers zusammengesetzt ist, die teilweise gegen weitere Rohre ausgewechselt werden können. Zwischen den einzelnen Rohrteilen befinden sich Standrohre, an denen die über der Ausflußöffnung liegende

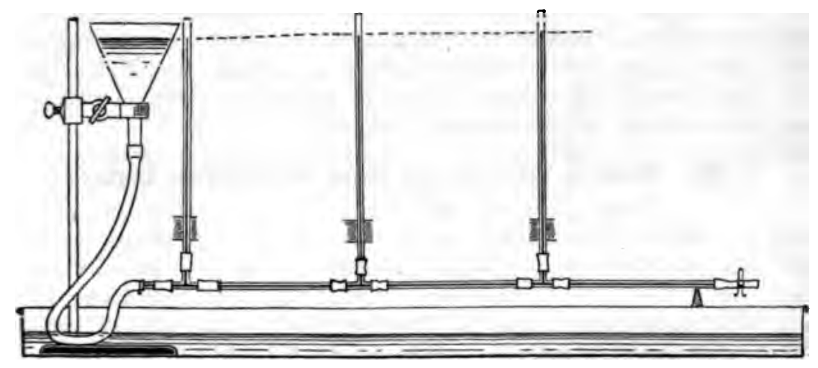


Fig. 27. Versuchsanordnung.

Druckhöhe für die betreffende Stelle des wagerechten Rohrlaufes gemessen werden kann. Zunächst ist die Wasserleitung am Ende geschlossen und wir beobachten an allen Standrohren und im Trichter dieselbe Höhe entsprechend dem Gesetz der kommunizierenden Gefäße. Dieser Zustand der Ruhe ist in Fig. 27 angedeutet.

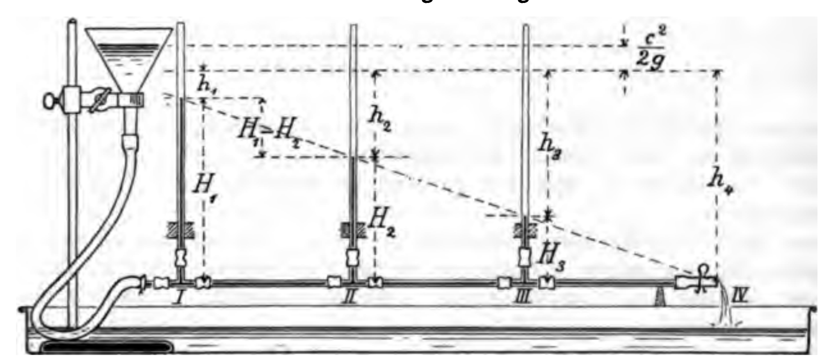


Fig. 28. Versuchsanordnung.

Wird der Quetschhahn am Ende der Leitung geöffnet, so fließt das Wasser, und nach kurzer Zeit stellen sich die Druckhöhen in den Standrohren bei Verwendung gleicher Rohrquerschnitte gemäß der Fig. 28 ein. Die Druckhöhe sinkt nach der Mündung hin. Jedes

Einzelrohr verbraucht durch die Überwindung der Reibungskräfte einen Teil der Druckhöhe. Ziehen wir von der gesamten Druckhöhe die Geschwindigkeitshöhe $c^2/2g$ ab, die bei gleichen Rohrweiten überall dieselbe ist, so wird der übrigbleibende Betrag für die Reibung der ganzen Leitung veräußert. Von *I* bis *IV* beansprucht die Reibung die Druckhöhe H_1, von *II* bis *IV* die Druckhöhe H_2, von *III* bis *IV* die Druckhöhe H_3, von *I* bis *II* die Druckhöhe $H_1 - H_2$ usw.; die durch Reibung bis zu den betreffenden Stellen verlorenen Höhen sind mit h_1, h_2, h_3 und h_4 bezeichnet. Gleiche Rohre verbrauchen in demselben Stromlauf gleiche Druckhöhen. Sind die Leitungsrohre genügend eng, so daß das Wasser tropfend austritt, so ist die Geschwindigkeit und damit auch die Geschwindigkeitshöhe nahezu der Null gleich. Für sehr dünne Rohre wird daher die ganze vorhandene Druckhöhe zur Überwindung der Reibungswiderstände verbraucht.

§ 29. Weitere Versuche an einer elektrischen Leitung.

An die Klemme I einer Akkumulatorenbatterie in Fig. 29 schließt sich ein dünner Metalldraht, an die Klemme II eine Kupferschiene, die nur als Verlängerung dieser Klemme anzusehen ist. Zwischen dem Ende des Drahtes und der Metallschiene liegt ein Ausschalter.

Wir gehen nun, während der Ausschalter offen ist, mit einem Spannungsmesser entlang des dünnen Drahtes, indem wir die eine Klemme des Instrumentes mit dem Draht, die andere mit der Metall-

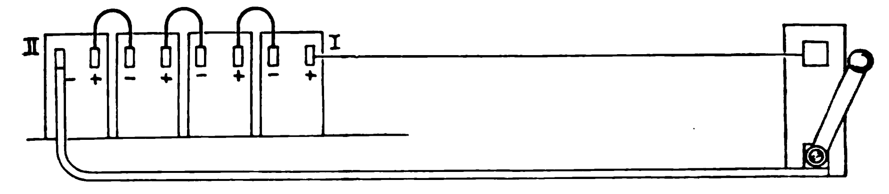


Fig. 29. Versuchsanordnung.

schiene verbinden. Wir haben dann zwischen allen Stellen des dünnen Drahtes und der Schiene dieselbe Spannung. Das ist immer richtig für jede Spannung und bei Anwendung beliebig feiner Drahtquerschnitte.*

Wird nun der Hebel eingelegt, so fließt ein Strom in dem Kreise, und ein abermaliges Anlegen des Spannungsmessers zwischen Draht und Schiene ergibt gegen das Ende hin abnehmende Voltzahlen, wie sie beispielweise in Fig. 30 angedeutet und an den betreffenden Stellen maßstäblich aufgetragen sind. Nennen wir die in der Fig. 30 aufgezeichneten Voltzahlen von links nach rechts entsprechend den römischen Zahlen E_1, E_2, E_3 usw., so erhalten wir den für die erste

* Je größer der Eigenwiderstand des Spannungsmessers ist, um so schärfer ist diese Tatsache zu beobachten.

Strecke von *I* bis *II* gebrauchten Betrag der Spannung (den Abfall) als $E_1—E_2$, für die zweite $E_2—E_3$, für die dritte $E_3—E_4$ usw.; für die zweite und dritte zusammen, d. h. von *II* bis *IV* erhalten wir den Abfall $E_2—E_4$, alles ganz entprechend den Druckhöhen bei Wasser.

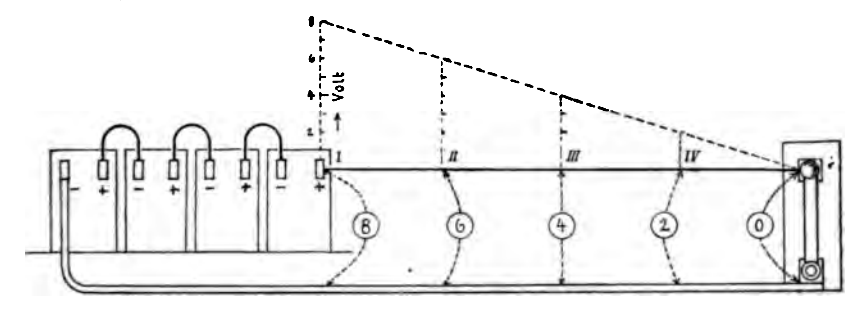


Fig. 30. Schema der Beobachtungen.

Der Spannungsmesser läßt uns den Abfall zwischen zwei beliebigen Stellen, z. B. *II* und *IV*, erkennen, wenn wir seine Anschlußdrähte an diese beiden Stellen legen.

Weiterhin soll nun der Plusdraht des Spannungsmessers am Pluspol der Batterie festliegen, während der andere Draht des Spannungsmessers an unserer Leitung entlang bewegt wird. Wir lesen dann diejenigen Teile der Spannung, die in dem Diagramm der Fig. 30 zwischen der schrägen Linie und einer durch 8 Volt gehenden wagerechten Linie gedacht werden können; diese Teile der Spannungen nennen wir e_1, e_2, e_3 usw. entsprechend den Werten h der Fig. 28. In der vorliegenden elektrischen Leitung wird die vorhandene Spannung allein zur Überwindung der im Stromlauf auftretenden Widerstände gebraucht. Es hat also das Strömen der Elektrizität die größte Ähnlichkeit mit dem Strömen des Wassers durch sehr enge Röhren (Kapillaren).

Unterbrechen wir den Stromlauf, so erkennen wir eine etwas höhere Spannung zwischen den Polen der Batterie als vorhin (gegen 8 Volt der Fig. 30 etwa 8,1 Volt). Das liegt daran, daß in der Stromquelle und in den Hilfsdrähten zur Verbindung der Einzelakkumulatoren dem Strom ebenfalls ein durch Länge, Querschnitt und Material vorgeschriebener Weg geboten wird, der auch Spannungsabfälle verursacht. Den geringen Spannungsabfall in diesen Teilen können wir vergleichen mit der bei Wasser in Fig. 28 eingetragenen Größe h_1, dem Druckabfall auf dem Wege vom Trichter bis zum Eintritt in den zur Beobachtung dienenden Rohrlauf.

§ 30. Das Ohmsche Gesetz.

A. Das Gesetz, bezogen auf einen Draht.

Schicken wir durch einen bestimmten Draht der Reihe

nach immer stärkere Ströme (wobei der Draht auf konstanter Temperatur zu halten ist), so steigt die Spannung (der beanspruchte Abfall) zwischen den Enden des Drahtes in demselben Maße, wie die Stromstärke im Drahte.

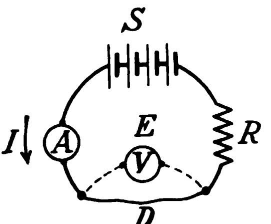


Fig. 31. Versuchsschema.

Versuchsbeispiel (vgl. Schema Fig. 31).
S = Stromquelle,
A = Strommesser,
V = Spannungsmesser,
D = Versuchsdraht,
R = ein vorgeschalteter veränderlicher Draht zur Veränderung der Stromstärke.

Ablesung an A $I_{\text{Amp.}}$	Ablesung an V E_{Volt}	Quotient $E:I$
6	1,2	1,2 : 6 = 0,2
12	2,4	2,4 : 12 = 0,2
18	3,6	3,6 : 18 = 0,2

Mit obigem Satz ist gleichbedeutend: Wird die Spannung an den Enden des Drahtes dividiert durch die Stromstärke im Draht, so ergibt das einen konstanten Wert. Diesen Wert bezeichnen wir als den Widerstand* des Drahtes.

Diese von Ohm[Hist. 23]) entdeckte Gesetzmäßigkeit zwischen Spannung und Strom, zunächst bezogen auf einen Draht, hat für beliebige Fälle die Form:

$$W = \frac{E}{I} \quad \text{(Ohmsches Gesetz)},$$

wobei die Bezeichnungen gelten:

I = Stromstärke im Draht (in Ampere),
E = gleichzeitig mit I auftretende Spannung zwischen den Enden des Drahtes (in Volt),
W = ein für den betreffenden Draht konstanter Wert, der Widerstand, der zu Ehren des Entdeckers dieser Gesetzmäßigkeit die Maßbezeichnung „Ohm" erhalten hat.

Unter 1 Ohm verstehen wir die elektrotechnische Einheit des Widerstandes. Sie wird in Übereinstimmung mit dem Reichsgesetz vom Juli 1898 dargestellt durch den Widerstand einer Säule aus reinem Quecksilber von 106,3 cm** Länge und 1 qmm Querschnitt bei Null Grad.

* Der so definierte Widerstand deckt sich mit den bisherigen Anwendungen dieses Wortes. Dünnere und längere Drähte lassen bei derselben Spannung weniger Strom durch, also ist der Widerstand $E:I$ größer, als bei dickeren und kürzeren Drähten.

** Die Länge 106,3 erscheint willkürlich. Das Weitere erklärt § 68.

Das Ohmsche Gesetz läßt sich schreiben:
1. in Worten: Widerstand = Spannung/Stromstärke;
2. in Maßbezeichnungen: Ohm = Volt/Ampere;
3. in Formelgrößen: $W = \frac{E}{I}$.

Mit der hier angeführten Form des Gesetzes gelten zugleich die Umformungen:

$$I = \frac{E}{W} \quad \text{und} \quad E = I \cdot W.$$

Durch die Festlegung des Ohm und des Ampere ist auch das Volt bestimmt nach dem Ohmschen Gesetz als die Spannung zwischen den Enden eines Leiters von 1 Ohm, der von 1 Ampere durchflossen ist.

1. Beispiel. Eine Glühlampe führt 0,5 Ampere, während an ihren Klemmen 120 Volt liegen. Wie groß ist ihr Widerstand?

Der Widerstand beträgt $W = \frac{E}{I} = \frac{120_{\text{Volt}}}{0{,}5_{\text{Amp.}}} = 240$ Ohm.

2. Beispiel. Einen Draht, von dem wir wissen, daß sein Widerstand 100 Ohm beträgt, legen wir an zwei Pole, deren Spannung zu konstant 220 Volt gerechnet werden kann. Wie groß ist die zu erwartende Stromstärke?

Der Strom beträgt $I = \frac{E}{W} = \frac{220_{\text{Volt}}}{100_{\text{Ohm}}} = 2{,}2$ Ampere.

3. Beispiel. Durch einen Draht von 0,1 Ohm wollen wir einen Strom von 60 Ampere schicken. Wie hoch ist die Spannung zwischen den Enden des Drahtes erforderlich?

Wir brauchen eine Spannung $E = I \cdot W = 60_{\text{Amp.}} \cdot 0{,}1_{\text{Ohm}} = 6$ Volt.

4. Beispiel. Zwischen zwei Kontakten eines schlechten Ausschalters messen wir bei 50 Ampere 0,5 Volt. Wie groß ist der Übergangswiderstand?

Er beläuft sich auf $W = \frac{E}{I} = \frac{0{,}5_{\text{Volt}}}{50_{\text{Amp.}}} = 0{,}01$ Ohm.

B. Das Gesetz, bezogen auf hintereinandergeschaltete Drähte.

Wir gehen von zwei Grundsätzen aus:
1. Die Stromstärke ist in hintereinandergeschalteten Teilen überall gleich.
2. Die Spannungen (Abfälle) mehrerer hintereinandergeschalteter Teile müssen addiert werden, damit wir die Spannung (den Abfall) zwischen den Enden des ganzen Stückes erhalten.

Denken wir uns nach Fig. 32 einen Stromkreis mit drei zwischen A und D liegenden, hintereinandergeschalteten Einzeldrähten und wenden wir die in diesem Paragraphen unter A gegebene Definition

des Widerstandes auf jeden Draht einzeln an, so sind die Einzelwiderstände:

$$w_1 = \frac{E_1}{I}, \quad w_2 = \frac{E_2}{I}, \quad w_3 = \frac{E_3}{I};$$

eine Addition dieser Einzelwerte ergibt die Summe:

$$W = w_1 + w_2 + w_3 = \frac{E_1}{I} + \frac{E_2}{I} + \frac{E_3}{I} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{I},$$

wobei der Nenner nach Grundsatz 1 gemeinsam ist.

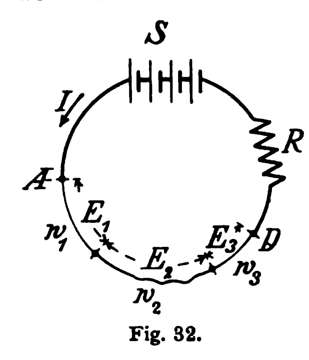


Fig. 32.

Bezeichnen wir nun die Summe $E_1 + E_2 + E_3$, also nach Grundsatz 2 diejenige Spannung, die wir zwischen A und D messen können, mit E, so wird:

$$W = w_1 + w_2 + w_3 = \frac{E}{I},$$

d. i. der Wert, den wir auch dadurch erhalten, daß wir zur Bestimmung des Widerstandes W die Methode von Absatz A dieses Paragraphen für den Teil von A bis D anwenden. Diese Betrachtung führt zu dem Satz:

Der Widerstand einer Reihe hintereinandergeschalteter Drähte ist gleich der Summe der Widerstände der Einzeldrähte.

C. Das Gesetz, angewendet auf einen ganzen Stromkreis.

Vom vorigen Falle gelangen wir zu diesem, wenn wir sämtliche Stromläufe eines Kreises mit ihren Widerständen einsetzen. Wir erhalten dann den Lehrsatz:

Der Widerstand eines Stromkreises ist gleich der Summe sämtlicher hintereinander geschalteter Einzelwiderstände des Kreises.

Hierbei ist besonders zu berücksichtigen, daß der Strom nicht nur durch den Außenkreis, sondern auch durch die Stromquelle selbst fließt, in der ebenfalls ein Widerstand auftritt. Der Widerstand der Stromquelle heißt der innere, der Widerstand des Außenkreises der äußere Widerstand. Daraus ergibt sich:

Der Gesamtwiderstand eines Kreises ist gleich der Summe des äußeren und des inneren Widerstandes.

Das Ohmsche Gesetz, bezogen auf einen ganzen Stromkreis, lautet:

Die Stromstärke stellt sich in einem Kreise so ein, daß die Summe der an den einzelnen hintereinandergeschalteten Widerständen des Kreises auftretenden Spannungsabfälle gleich ist der bei diesem Vorgang auftretenden elektromotorischen Kraft. Als die elektromotorische Kraft soll hierbei zunächst diejenige der Stromquelle unter Abwesenheit anderer elektromotorischer Kräfte im Kreise verstanden werden.

§ 31. Elektromotorische Kraft, Klemmenspannung und Spannungsverlust.

In dem Schema der Fig. 33 komme es darauf an, daß der mit R bezeichnete Teil des Kreises von Strom durchflossen sei. Damit das möglich ist, muß auch die Stromquelle S und die Leitung LL den Strom führen, also muß von dem Strome nicht nur der Widerstand von R, sondern auch der Widerstand von S und LL überwunden werden. Ist seitens der Stromquelle die elektromotorische Kraft E zur Verfügung, so ergibt sich der Strom zu:

$$I = \frac{E}{w_R + w_{LL} + w_S},$$

Fig. 33.

wobei die Größen w die Widerstände der durch den Index angegebenen Teile bedeuten mögen; oder es ist:

$$E = I(w_R + w_{LL} + w_S);$$

die rechte Seite läßt sich zerlegen, so wird:

$$E = Iw_R + I(w_{LL} + w_S);$$

$I \cdot w_R$ ist die in Fig. 33 mit E' bezeichnete Spannung, die wir zwischen den Enden der Leitung oder, was dasselbe bedeutet, zwischen den Enden des Drahtes R haben. Diese in der Fig. 33 hervorgehobenen Punkte bezeichnen wir als die Klemmen, und E' als die Klemmenspannung.

Es gilt dann weiter:

$$E = E' + I(w_S + w_{LL}).$$

Dieser Wert stellt die während der Stromlieferung auftretende, unmittelbar nicht meßbare elektromotorische Kraft der Stromquelle dar. Die elektromotorische Kraft schreibt man abgekürzt die EMK.

Der Ausdruck $I(w_S + w_{LL})$ bestimmt die für die Überwindung des Widerstandes der Stromquelle und der Zuleitung erforderliche Spannung. Diese Spannung wird in Anbetracht des Zweckes, daß allein R von I durchflossen werden soll, nutzlos aufgewendet, und man bezeichnet sie daher als Spannungsverlust, der mit E_v hier angedeutet sein möge:

$$E = E' + E_v;$$

oder in Worten:

Wir erhalten die elektromotorische Kraft eines Kreises, indem wir die Klemmenspannung und die bis zu den Klemmen auftretenden Verlustspannungen addieren.

Bei den Anlagen der Technik wird der innere Widerstand der Stromquellen und der Widerstand der Leitungen sehr gering gehalten,

damit die Spannungsverluste gering sind. Damit tritt zugleich die Gefahr auf, daß bei unmittelbarer gegenseitiger Berührung der Leitungen sich eine sehr große, meistens unzulässig große Stromstärke einstellt, wobei die Leitungsdrähte erglühen können und die Stromquelle zerstört werden kann. Man hält den Betriebsstrom, wo es nötig ist*, durch entsprechende Bemessung des äußeren Widerstandes in Grenzen, während eine gefährdende Verbindung, bei der der äußere Widerstand zu gering ist, als ein Kurzschluß bezeichnet wird. Mit dieser Erörterung erklärt sich die Notwendigkeit der Verwendung von Schmelzsicherungen.

1. Beispiel. Zwischen den Polen einer Elektrizitätsquelle sind drei Drähte hintereinandergeschaltet. Im Stromkreis fließen 6 Ampere. An den Enden des ersten, stärkeren Drahtes messen wir 1 Volt, zwischen den Enden des zweiten, dünneren Drahtes 12 Volt, und zwischen den Enden des dritten Drahtes 2 Volt.

Wie groß sind die Widerstände der einzelnen Drähte?

Der Widerstand des 1. Drahtes beträgt $w_1 = \frac{1_{\text{Volt}}}{6_{\text{Amp.}}} = \frac{1}{6}$ Ohm

" " " 2. " " $w_2 = \frac{12_{\text{Volt}}}{6_{\text{Amp.}}} = 2$ Ohm

" " " 3. " " $w_3 = \frac{2_{\text{Volt}}}{6_{\text{Amp.}}} = \frac{1}{3}$ Ohm.

Wie groß ist der Widerstand der drei hintereinandergeschalteten Drähte zusammen?

Der Gesamtwiderstand der drei Drähte beträgt:

$$W = w_1 + w_2 + w_3 = \tfrac{1}{6} + 2 + \tfrac{1}{3} = \tfrac{5}{2} \text{ Ohm}.$$

2. Beispiel. In einem Stromkreise messen wir 40 Ampere und an der Stromquelle, einem Akkumulator, 1,98 Volt. Sofort nach der Stromunterbrechung zeigt der Akkumulator eine Spannung (die EMK) von 2,00 Volt.

1. Wie groß ist der Widerstand des Außenkreises?
2. Wie groß ist der Widerstand des ganzen Kreises?
3. Wie groß ist der innere Widerstand?

1. Der Außenwiderstand ist:

$$w_a = \frac{1{,}98_{\text{Volt}}}{40_{\text{Amp.}}} = 0{,}0495 \text{ Ohm},$$

2. Der Widerstand des Kreises ist:

$$w = \frac{2{,}0_{\text{Volt}}}{40_{\text{Amp.}}} = 0{,}05 \text{ Ohm},$$

3. Der innere Widerstand ist:

$$w_i = w - w_a = 0{,}05 - 0{,}0495 = 0{,}0005 \text{ Ohm},$$

* Vgl. elektromotorische Gegenkräfte § 33.

oder, was auf dasselbe hinausläuft,

$$= \frac{(2{,}0 - 1{,}98)_{\text{Volt}}}{40_{\text{Amp.}}} = \frac{0{,}02_{\text{Volt}}}{40_{\text{Amp.}}} = 0{,}0005 \text{ Ohm.}$$

3. Beispiel. An den Klemmen einer Stromquelle, die mit $I = 30$ Ampere durchflossen ist, messen wir die Klemmenspannung $E' = 120$ Volt; der innere Widerstand betrage $w_i = 0{,}1$ Ohm. Wie groß ist die EMK der Stromquelle?

Die EMK der Stromquelle beträgt:

$$E = E' + I \cdot w_i = 120 + 30 \cdot 0{,}1 = 123 \text{ Volt.}$$

§ 32. Der Einfluß des Materiales und der Temperatur und die Berechnung von Drahtwiderständen.

A. Versuche. Es werden nacheinander ein Nickelindraht, ein Eisendraht, ein Messingdraht und ein Kupferdraht von gleicher Länge und gleichem Querschnitt an einen Akkumulator angeschlossen, wobei außerdem nur noch ein Strommesser und ein Ausschalter im Kreise sind. Bei Einschaltung ergeben sich folgende Stromstärken:

bei Nickelin . .	0,65	Ampere
bei Eisen . . .	2,9	„
bei Messing . .	4,5	,
bei Kupfer . . .	18,5	„

Diese einfachen Versuche zeigen schon die großen Verschiedenheiten in der Stromleitung bei den einzelnen Metallen.

B. Verallgemeinerung. Um das Material rechnerisch zu berücksichtigen, hat man den Widerstand der Materialien von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bestimmt, und nennt diese Ohmzahl (mit dem Formelzeichen c) den spezifischen Widerstand des Materiales. Ist nun ein Draht länger als 1 m, so ist der Widerstand entsprechend größer; ist der Querschnitt größer als 1 qmm, so ist der Widerstand entsprechend kleiner. Als Formel ausgedrückt, heißt das: Es ist der Widerstand eines beliebigen Drahtes in Ohm:

$$W = \frac{l}{q} \cdot c;$$

dabei bedeutet: l = Länge des Drahtes (m),
q = Querschnitt des Drahtes (qmm),
c = spezifischer Widerstand des Materiales.

Geringe Beimengungen zu den Metallen können den spezifischen Widerstand sehr verändern. Für mittlere käuflich erhältliche Materialien gibt die Zusammenstellung unter E dieses Paragraphen einige Werte von c in der Reihenfolge der Leitungsfähigkeit.

C. Versuche. Erwärmen wir den Kupferdraht von Abschnitt A dieses Paragraphen durch eine Anzahl Flammen, so geht die Strom-

stärke in dem oben beschriebenen Kreise auffällig zurück. Entfernen wir die Flammen, so steigt der Strom, und kühlen wir den Draht durch Wasser, so bekommen wir die früheren 18,5 Ampere wieder.

D. Verallgemeinerung. Die meisten Metalle vergrößern den Widerstand mit Erhöhung der Temperatur. Eine Ausnahme bildet das Mangan und die zu den metallischen Leitern gehörende Kohle, die beide mit Erhöhung der Temperatur den Widerstand verringern. Man hat zwischen Widerstand und Temperatur für nicht zu weite Grenzen angenäherte Proportionalität beobachtet (ähnlich der Ausdehnung der Materialien), und man bezeichnet die Ohmzahl, um die sich 1 Ohm des betreffenden Materiales bei 1 Grad Erhöhung der Temperatur vergrößert, den Temperaturkoeffizienten (als Formelzeichen α) des betreffenden Materiales. Kohle und Mangan haben demnach ein negatives α, die meisten Metalle dagegen ein positives. So gilt:

$$W_{\tau_2} = W_{\tau_1}[1 + \alpha(\tau_2 - \tau_1)],$$

dabei bedeutet: W_{τ_2} den Widerstand bei der höheren Temp. (Ohm),
W_{τ_1} „ „ „ „ niederen „ („),
α den Temperaturkoeffizienten des betr. Materiales,
τ_2 die höhere Temperatur (Grad Celsius),
τ_1 „ niedere „ („ „).

Unter E dieses Paragraphen sind in der mit α bezeichneten Spalte für die wichtigsten Materialien die Temperaturkoeffizienten angegeben.

E. Tabelle und Beispiele.

Nr.	Material	c (bei 15°)	α
1	Silber	0,016	0,0038
2	Kupfer (für Leitungen)	0,0175 ~ 1:57	0,004
3	Aluminium	0,029	0,0039
4	Zink	0,059	0,0036
5	Messing	0,071	0,0016
6	Platin	0,094	0,0024
7	Eisen	0,11	0,0048
8	Nickel	0,13	0,0036
9	Blei	0,207	0,0039
10	Neusilber*	0,30	0,0003
11	Manganin*	0,47	± 0,0000(1)
12	Nickelin*	0,50	0,00001
13	Kruppin*	0,85	0,0007
14	Quecksilber	0,9535	0,0009
15	Wismut	1,2	0,00354
16	Kohle	40 bis 100	− 0,0003
17	Schwefelsäure (spez. Gew. = 1,22)	13 000	− 0,0162
18	Konzentrierte Kochsalzlösung	49 770	− 0,0209 **
19	Hartgummi	$4,2 \cdot 10^{13}$	—

* Diese Materialien sind als Widerstandsmaterialien künstlich zusammengestellt.

** α unter Bedingung, daß die Lösung bei höheren Temperaturen konzentriert bleibt.

1. Beispiel. Wie groß ist der Widerstand einer Telegraphenleitung von 10 km Länge, wenn der aus Eisen bestehende Draht 5 mm Durchmesser hat?

Der Widerstand beträgt:

$$w = \frac{l}{q} \cdot c = \frac{10\,000_{\mathrm{m}}}{\left(5^2 \cdot \frac{\pi}{4}\right)_{\mathrm{qmm}}} \cdot 0{,}11 = 56{,}1 \text{ Ohm}.$$

2. Beispiel. Wie groß ist der Widerstand eines Kupferdrahtes von 2 mm Durchmesser und 1,5 m Länge?

Der Widerstand beträgt:

$$w = \frac{l}{q} \cdot c = \frac{1{,}5_{\mathrm{m}}}{\left(2^2 \cdot \frac{\pi}{4}\right)_{\mathrm{qmm}}} \cdot \frac{1}{57} = 0{,}00838 \text{ Ohm}.$$

3. Beispiel. Wieviel muß 1 kg Aluminium kosten, wenn es in bezug auf seinen Widerstand mit Kupfer konkurrieren soll? Das spezifische Gewicht des Aluminiums sei $s_{\mathrm{Al}} = 2{,}6$, dasjenige des Kupfers $s_{\mathrm{Cu}} = 8{,}9$. Die Kosten des Kupfers seien mit 2 ℳ auf 1 kg in Rechnung gesetzt.

Es bezeichne l die Drahtlänge und w den Widerstand in einem beliebigen Falle für Kupfer und Aluminium als gleiche Größen. So gilt:

$$w = \frac{l}{q_{\mathrm{Cu}}} \cdot \frac{1}{57} = \frac{l}{q_{\mathrm{Al}}} \cdot 0{,}029\,;$$

daraus folgt:

$$q_{\mathrm{Al}} = q_{\mathrm{Cu}} \cdot 57 \cdot 0{,}029 = q_{\mathrm{Cu}} \cdot 1{,}653\,;$$

oder es muß sein, wenn P das Gewicht bezeichnet:

$$P_{\mathrm{Al}} = P_{\mathrm{Cu}} \cdot 1{,}653 \cdot \frac{2{,}6}{8{,}9} = P_{\mathrm{Cu}} \cdot 0{,}483\,;$$

daraus folgt, wenn K die Kosten auf 1 kg bezeichnen, daß der Preis des Aluminiums sein darf:

$$K_{\mathrm{Al}} = 2 \cdot \frac{1}{0{,}483} = 4{,}15 \text{ ℳ/kg}.$$

4. Beispiel. Es soll die Länge des Drahtes einer Kupferspule mit Hilfe einer Widerstands- und einer Querschnittsmessung bestimmt werden. Der Widerstand sei bestimmt worden zu $w = 5$ Ohm, der Querschnitt des Kupferdrahtes zu $q = 2$ qmm. Wie groß ist die Länge des Drahtes?

Aus $w = \frac{l}{q} \cdot c$ folgt:

Länge des Drahtes $l = \frac{w \cdot q}{c} = 5_{\mathrm{Ohm}} \cdot 2_{\mathrm{qmm}} \cdot 57 = 570$ m.

5. Beispiel. An einer Spule, deren Draht 2,0 mm Kupferdurchmesser (d_{Cu}) und 2,5 mm Außendurchmesser (d_a) hat, mißt man innen zwischen den Windungen $D_i = 30$ mm lichten Durchmesser, während die äußersten Windungen im Außendurchmesser $D_a = 50$ mm aufweisen; in Richtung der Achse besitze die Spule eine Länge $L = 90$ mm. Wie groß ist der Widerstand der Spule?

Die radiale Wicklungshöhe beträgt:

$$H = \frac{D_a - D_i}{2} = \frac{50 - 30}{2} = 10 \text{ mm.}$$

Die Zahl der Schichten ist:

$$z_1 = \frac{H}{d_a} = \frac{10}{2,5} = 4.$$

Die Zahl der Windungen einer Schicht:

$$z_2 = \frac{L}{d_a} = \frac{90}{2,5} = 36.$$

Die Gesamtzahl der Windungen:

$$z = z_1 \cdot z_2 = 4 \cdot 36 = 144.$$

Mittlerer Windungsdurchmesser:

$$D = \frac{D_a + D_i}{2} = \frac{50 + 30}{2} = 40 \text{ mm.}$$

Gesamte Drahtlänge der Spule:

$$l = z \cdot D \cdot \pi = 144 \cdot 40 \cdot \pi = 5760 \cdot \pi \text{ mm} = 5,76 \cdot \pi \text{ m.}$$

Der Widerstand der Spule beträgt:

$$w = \frac{l}{q} \cdot c = \frac{5,76 \cdot \pi}{2^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 57} = 0,101 \text{ Ohm.}$$

6. Beispiel. An einer nicht zugänglichen kupfernen Doppelleitung von 12 m einfach gemessener Länge sind bei $i = 40$ Ampere $e_v = 1,7$ Volt Spannungsverlust gemessen worden. Wie groß berechnet sich daraus ihr Kupferquerschnitt?

Der Widerstand der Leitung beträgt $w = \frac{e_v}{i} = \frac{1,7}{40} = 0,0425$ Ohm.

Aus $w = \frac{l}{q} \cdot c$ folgt:

$$q = \frac{l}{w} \cdot c = \frac{2 \cdot 12}{0,0425} \cdot \frac{1}{57} = 9,91 \text{ qmm Kupferquerschnitt.}$$

7. Beispiel. Von den Polen einer Stromquelle aus ist eine Doppelleitung aus Kupfer zu verlegen bis zu einem Leuchter, dessen Lampen zusammen 6 Ampere führen. Bei 6 Ampere sollen am Ende der Leitung noch 108,8 Volt vorhanden sein, während die Stromquelle

110 Volt führt. Die einfach gemessene Streckenlänge der Leitung betrage 56 m. Wie groß ist der erforderliche Kupferquerschnitt der Leitung?

Der Spannungsabfall der Leitung beträgt $e_v = 110 - 108{,}8 = 1{,}2$ Volt; bei der Stromstärke von $i = 6$ Ampere ergibt das den erforderlichen Widerstand der Leitung:

$$w = \frac{e_v}{i} = \frac{1{,}2}{6} = 0{,}2 \text{ Ohm};$$

der Leitungsquerschnitt muß daher sein:

$$q = \frac{l}{w} \cdot c = \frac{2 \cdot 56}{0{,}2} \cdot \frac{1}{57} = 9{,}824 \sim 10 \text{ qmm}.$$

8. Beispiel. In einem Gefäß ist dem Strome ein Querschnitt von 200×300 qmm bei einer Länge von 0,25 m geboten. Das Gefäß ist mit Leitungswasser gefüllt, und es führt 0,8 Ampere, während die zur Überwindung des Wasserwiderstandes dienende Spannung 100 Volt beträgt. Wie groß ist der spezifische Widerstand dieses Leitungswassers?

Aus $w = \frac{l}{q} \cdot c$ folgt $c = w \cdot \frac{q}{l}$.

Der spezifische Widerstand des vorliegenden Wassers wird gefunden zu

$$c = \left(\frac{100}{0{,}8}\right)_{\text{Ohm}} \cdot \frac{60000_{\text{qmm}}}{0{,}25_{\text{m}}} = 30 \text{ Million Ohm auf m und qmm.}$$

9. Beispiel. Ein Wismutdraht habe bei $\tau_1 = 15$ Grad 20 Ohm; wie groß ist sein Widerstand bei $\tau_2 = 24$ Grad?

Der Widerstand bei 24 Grad wird:

$$\begin{aligned} w_{\tau_2} = w_{\tau_1}[1 + \alpha(\tau_2 - \tau_1)] &= 20\,[1 + 0{,}00354\,(24 - 15)] \\ &= 20\,[1 + 0{,}03186] \\ &= 20{,}637 \sim 20{,}64 \text{ Ohm}. \end{aligned}$$

10. Beispiel. Vom Strom erwärmte Spulen sind im Innern stets heißer als außen. Man bestimmt daher zweckmäßig die mittlere Temperatur durch zwei Widerstandsmessungen, kalt und warm. Eine Kupferspule habe bei $\tau_1 = 18$ Grad $w_{\tau_1} = 50$ Ohm. Nach längerer Stromdauer wird ihr Widerstand zu $w_{t_2} = 62$ Ohm bestimmt. Wie heiß ist im letzteren Falle die Spule?

Aus $w_{\tau_2} = w_{\tau_1}[1 + \alpha(\tau_2 - \tau_1)]$ folgt:

die Übertemperatur $\tau' = \tau_2 - \tau_1 = \frac{w_{\tau_2} - w_{\tau_1}}{\alpha \cdot w_{\tau_1}}$;

im vorliegenden Falle wird die Übertemperatur:

$$\tau' = \tau_2 - \tau_1 = \frac{62 - 50}{0{,}004 \cdot 50} = \frac{12}{0{,}2} = 60 \text{ Grad},$$

und die Temperatur der Spule:

$$\tau_2 = 18^0 + 60^0 = 78 \text{ Grad}.$$

11. Beispiel. Wie groß ist der Temperaturkoeffizient des Platinsilbers, wenn ein aus dieser Legierung hergestellter Draht bei $\tau_1 = 15$ Grad 2,500 Ohm, und bei $\tau_2 = 60$ Grad 2,536 Ohm aufweist?

Aus $w_{\tau_2} = w_{\tau_1}[1 + \alpha(\tau_2 - \tau_1)]$ folgt:

$$\alpha = \frac{w_{\tau_2} - w_{\tau_1}}{w_{\tau_1} \cdot (\tau_2 - \tau_1)}$$ und für dieses Beispiel:

$$\alpha = \frac{2{,}536 - 2{,}500}{2{,}5\,(60 - 15)} = 0{,}00032.$$

F. Zusammenstellung des Ohmschen Gesetzes mit dem Ergebnis dieses Paragraphen.

Das Produkt aus dem unter B berechneten Widerstande eines Leiters und dem in diesem Widerstande auftretenden Strome ist der von dem Leiter bei diesem Strome beanspruchte Potentialabfall. Die Summe der von sämtlichen hintereinandergeschalteten Widerständen eines Kreises herrührenden und beanspruchten Potentialabfälle ist ebenso groß, wie die EMK. des Kreises; oder bei gegebener EMK stellt sich die Stromstärke so ein, daß obiger Satz erfüllt ist. Sind die einzelnen Teile eines Stromweges durch entsprechenden Index angedeutet, so heißt das Ohmsche Gesetz

$$E = I\left(\frac{l_1}{q_1} \cdot c_1 + \frac{l_2}{q_2} \cdot c_2 + \frac{l_3}{q_3} \cdot c_3 + \dots\right)$$

oder

$$E - I\left(\frac{l_1}{q_1} \cdot c_1 + \frac{l_2}{q_2} \cdot c_2 + \frac{l_3}{q_3} \cdot c_3 + \dots\right) = 0,$$

wobei E die EMK in algebraischer Summe (s. § 33) des Kreises ausdrückt.

§ 33. Gegenspannungen.

Versuchsbeispiel. Schließt sich an eine Batterie nach dem Schema der Fig. 34 ein Stromkreis, in dem sich ein Element befindet, dessen Pluspol mit dem positiven Pol der Batterie verbunden ist, so hat der Strom gegen die Spannung dieses Elementes zu fließen; das Element ist gegen die Batterie geschaltet, es besitzt eine Gegenspannung gegen den Strom. Sind die Elemente der als Stromquelle dienenden Batterie S und das in Gegenschaltung befindliche Element gleichartig, so vergrößert jede Zelle von S die vorhandene Spannung (EMK) um eine Stufe, während bei dem Element S' eine dieser Stufen entgegensteht. Es fließt der Strom I in diesem Kreise, gerade als ob sich das Element S' gegen ein Element von S höbe, so daß für den Stromkreis in dem gezeichneten Beispiel mit 6 Elementen nur 4 Einzelstromquellen übrig blieben. Also I ist

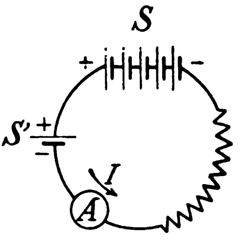


Fig. 34. Stromkreis mit gegengeschaltetem Element.

geringer als wenn S' nicht da wäre, auch wenn der Widerstand von S' gleich Null gesetzt werden kann. Nehmen wir ein Element aus S heraus, und schalten wir es hinter S', so daß sein Pluspol mit dem negativen Pol von S' verbunden ist, so wird I gegen vorhin weiter verringert, denn nun tritt ein Strom auf, als wirkten nur 2 Elemente bei S. Nehmen wir ein weiteres Element der Batterie in derselben Weise zu S', so sind drei gegen drei Elemente geschaltet und es fließt, obgleich der Kreis in sich geschlossen ist, kein Strom; die beiden Spannungen halten einander das Gleichgewicht. Eine abermalige Vermehrung der hintereinandergeschalteten Elemente bei S' führt zur Umkehr des Stromes, indem die Elemente bei S' zur Stromquelle werden.

Verallgemeinerung. Ist in einem Kreise die Spannung E (als EMK) vorhanden, während der Strom eine Gegenspannung E'' (als elektromotorische Gegenkraft) (als EMGK) zu überwinden hat, so gilt das Ohmsche Gesetz in der Form:

$$I = \frac{E - E''}{W};$$

dabei bedeutet: I die Stromstärke des Kreises (Ampere),
E die Spannung (EMK) der Stromquelle (Volt),
E'' die Gegenspannung (EMGK) (Volt),
W den Widerstand des Kreises (Ohm).

Beispiel. Ein zu ladender Akkumulator ist gegen die Stromquelle zu schalten. Bei der Ladung steigt seine Spannung von 2,1 auf 2,7 Volt. Ein Akkumulator soll mit 5 Ampere von zwei hintereinandergeschalteten Akkumulatoren aus geladen werden, deren Klemmenspannung konstant zu 3,95 Volt angenommen werden soll. Wie groß muß der Widerstand des Kreises beim Beginn und beim Ende der Ladung sein?

Wir rechnen nach der Formel $I = \frac{E - E''}{W}$, die ergibt:

$$W = \frac{E - E''}{I};$$

für Beginn der Ladung ist der Widerstand des Kreises:

$$W = \frac{3{,}95 - 2{,}1}{5} = 0{,}37 \text{ Ohm erforderlich,}$$

für das Ende der Ladung brauchen wir:

$$W = \frac{3{,}95 - 2{,}7}{5} = 0{,}25 \text{ Ohm im Kreise.}$$

§ 34. Stromverzweigungen.

Unter einer Stromverzweigung verstehen wir eine Schaltung, bei der sich der Stromlauf teilt und an einer anderen Stelle wieder ver-

einigt. Fig. 35 stellt zwischen den Punkten a und b den einfachsten Fall einer Verzweigung dar. Die beiden Zweige sind nebeneinander, oder was dasselbe bedeutet, parallelgeschaltet. Es gelten für die Stromverzweigungen die Kirchhoffschen[Hist. 38]) Regeln:

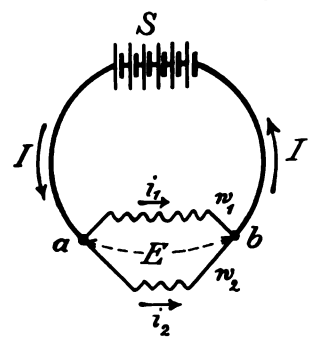


Fig. 35. Stromverzweigung.

1. Bei einer Stromverzweigung ist die Summe der Ströme in den einzelnen Zweigen gleich dem Strom im unverzweigten Teile.

2. Die Ströme der einzelnen Zweige verhalten sich umgekehrt, wie die Widerstände.

Der erste Teil dieser Regeln folgt unmittelbar aus dem schon früher ausgesprochenen Satz, daß der Strom in jedem Querschnitt eines Kreises derselbe ist. Der Querschnitt des Kreises am verzweigten Teile ist der Querschnitt durch alle Zweige zusammen, und es wird mit den Bezeichnungen der Fig. 35:

1) $$I = i_1 + i_2 .$$

Der zweite Teil folgt aus dem Ohmschen Gesetz mit Berücksichtigung der Tatsache, daß die Spannung zwischen dem Anfangs- und dem Endpunkt der Verzweigung für alle Zweige die gleiche ist. Sei im Beispiel der Fig. 35 die Spannung zwischen a und b gleich E, so sagt das Ohmsche Gesetz mit den Bezeichnungen der Fig. 35:

$$E = i_1 \cdot w_1 = i_2 \cdot w_2 ,$$

oder es gilt:

2) $$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} .$$

Aus den Kirchhoffschen Regeln folgt der Widerstand beider Zweige zusammen (der Ersatzwiderstand der Verzweigung):

$$R = \frac{E}{I} = \frac{E}{i_1 + i_2} = \frac{E}{\frac{E}{w_1} + \frac{E}{w_2}} = \frac{1}{\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}} = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2} .$$

Für drei Zweige gilt:

1) $$I = i_1 + i_2 + i_3 ,$$

2) $$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} ; \quad \frac{i_1}{i_3} = \frac{w_3}{w_1} ; \quad \frac{i_2}{i_3} = \frac{w_3}{w_2} ;$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3}} = \frac{w_1 \cdot w_2 \cdot w_3}{w_2 \cdot w_3 + w_1 \cdot w_3 + w_1 \cdot w_2} .$$

Nach diesem Vorgang können die Regeln auf beliebig viele Zweige angewendet werden.

Liegt ein System von Verzweigungen vor, in dem sowohl Widerstände, als auch elektromotorische Kräfte enthalten sind, etwa nach Art der in Fig. 36 gezeichneten Elemente, so ist stets für jeden einzelnen Zweig die Summe der Widerstände, alle mit positivem Vorzeichen, und die Summe aller elektromotorischen Kräfte des Zweiges, jedesmal mit zugehörigem Vorzeichen, zur Berechnung der Stromstärke einzusetzen. Mit den Bezeichnungen der Figur ist:

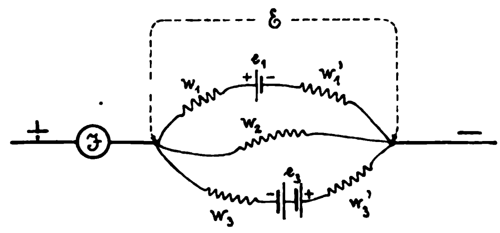


Fig. 36. Zweige mit elektromotorischen Kräften.

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \frac{E - e_1}{w_1 + w_1'}, \\ i_2 &= \frac{E}{w_2} \\ i_3 &= \frac{E + e_3}{w_3 - w_3'}, \end{aligned}\right\} i_1 + i_2 + i_3 = I.$$

Die Summenformel der Stromstärken gilt algebraisch.

Für jede beliebige und beliebig verzweigte Schaltung gilt: Legen wir einen Schnitt durch die ganze Schaltung, so ist die algebraische Summe der durch den Schnitt getroffenen Stromstärken gleich Null.

1. Beispiel. § 31 hat gezeigt, daß die Widerstände elektrischer Leitungen sehr gering gehalten werden. Die Leitungen können als verlängerte Klemmen der Stromquelle angesehen werden und bilden die Ausgangspunkte der sehr vielfachen Verzweigung, die dadurch entsteht, daß alle Glühlampen einer Anlage parallel geschaltet werden.

Es sind 200 Glühlampen von je $E = 120$ Volt und $i = 0{,}5$ Ampere parallelgeschaltet. Wie groß ist die Stromstärke der ganzen Verzweigung und wie groß der Widerstand des Außenkreises unter Vernachlässigung der Leitungsdrähte?

Die Stromstärke der Verzweigung beträgt:

$$I = i_1 + i_2 + i_3 + \ldots = 200 \cdot i = 200 \cdot 0{,}5 = 100 \text{ Ampere}.$$

Der Widerstand der ganzen Verzweigung $= \frac{E}{I} = \frac{120}{100} = 1{,}2$ Ohm; wir erkennen, daß 200 parallelgeschaltete Lampen 1/200 des Widerstandes einer Lampe (vgl. 1. Beispiel von § 30) besitzen. Allgemein heißt das: Der Widerstand des Außenkreises einer Glühlichtanlage ist umgekehrt proportional zur Zahl der widerstandsgleichen Lampen.

2. Beispiel. Ein Spannungsmesser liegt parallel zu einem Stromleiter von $w_1 = 5$ Ohm, der von $i_1 = 20$ Ampere durchflossen ist. Wie groß ist der Strom i_2 im Spannungsmesser, wenn dessen Widerstand 15000 Ohm beträgt? Wie groß ist die Stromstärke im Zuleitungsdraht der Verzweigung?

$$\text{Aus } \frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} \text{ folgt } i_2 = i_1 \cdot \frac{w_1}{w_2};$$

daher führt der Spannungsmesser den Strom:

$$i_2 = 20 \cdot \frac{5}{15000} = \frac{1}{150} = 0{,}00666\ldots \text{ Ampere.}$$

Der Strom in der Zuleitung hat:

$$I = i_1 + i_2 = 20 + 0{,}00666\ldots = 20{,}00666\ldots \text{ Ampere.}$$

Nehmen wir an, daß die Strommesserskala vom Nullpunkt bis zu 20 Amp. 10 cm lang ist, so wäre die Einstellung des Zeigers durch das Abschalten des Spannungsmessers nur um $\frac{3{,}3\ldots}{100}$ mm geändert worden, d. h. um einen technisch belanglosen und gewöhnlich nicht erkennbaren Wert.

3. Beispiel. Es soll zu einem von $i_1 = 40$ Ampere durchflossenen Strommesser von $w_1 = 0{,}01$ Ohm ein Nebenschluß von der Ohmzahl w_2 gelegt werden, so daß die Zuleitung zur Verzweigung einen Strom $I = 160$ Ampere führt (vgl. Fig. 37). Auf diese Weise wird das Meßbereich des Strommessers vervierfacht. Wieviel Strom fließt durch w_2 um den Strommesser herum, und wie groß ist die Ohmzahl w_2?

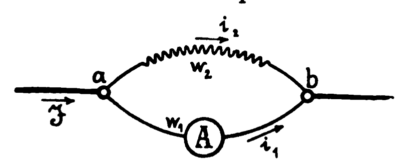


Fig. 37. Veränderung des Meßbereichs eines Strommessers.

$$\text{Aus } I = i_1 + i_2 \text{ folgt } i_2 = I - i_1;$$

das ergibt in diesem Fall: $i_2 = 160 - 40 = 120$ Ampere.

$$\text{Die Beziehung: } \frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} \text{ ergibt } w_2 = w_1 \cdot \frac{i_1}{i_2};$$

daher wird der Widerstand des Nebenschlusses ermittelt zu:

$$w_2 = 0{,}01 \cdot \frac{40}{120} = \frac{1}{300} \text{ Ohm.}$$

Wir brauchen zur Vervierfachung des Meßbereichs bei einem Strommesser $^1/_3$ des Instrumentenwiderstandes im Nebenschluß und haben die Angaben des Strommessers mit 4 zu multiplizieren.

Zur Ver-z-fachung des Meßbereichs eines Strommessers vom Widerstand w haben wir $w \frac{1}{z-1}$ Ohm dem Instrument parallel zu schalten, wobei die Angaben des Instrumentes mit z zu multiplizieren sind.

4. Beispiel. Es soll mit dem bis 150 Volt verwendbaren Spannungsmesser des 2. Beispiels dieses Paragraphen bis 450 Volt gemessen werden. Was ist zu diesem Zweck zu tun?

Da die Stromstärke im Spannungsmesser allein für die Stellung des Zeigers maßgebend ist, muß dafür gesorgt werden, daß die Stromstärke im Spannungsmesserzweige i_2 den Wert $150_{\text{Volt}} : 15\,000_{\text{Ohm}} =$ 0,01 Ampere nicht überschreitet. Das ist nur dadurch denkbar, daß der Widerstand des Spannungsmesserzweiges vergrößert wird. In demselben Maße, wie der Widerstand zwischen den Klemmen a und b der Meßanordnung in Fig. 38 vergrößert wird, kann auch die Spannung zwischen ihnen gesteigert werden. Der Spannungsmesserwiderstand W_1 und sein Vorschaltwiderstand W_2 haben Spannungsabfälle, die den Ohmzahlen proportional sind:

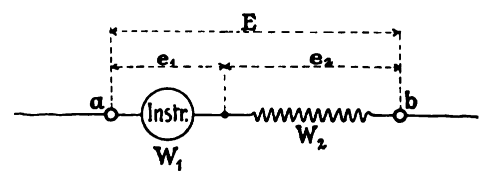


Fig. 38. Spannungsmesser-Vorschaltwiderstand.

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{W_1}{W_2},$$

und die Gesamtspannung beträgt:

$$E = e_1 + e_2;$$

daraus folgt in unserem Beispiel:

$$e_2 = E - e_1 = 450 - 150 = 300 \text{ Volt}$$

und der Vorschaltwiderstand ergibt sich zu:

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{e_2}{e_1} = 15\,000 \cdot \frac{300}{150} = 30\,000 \text{ Ohm}.$$

Zur Ver-z-fachung des Meßbereichs eines Spannungsmessers vom Widerstand W haben wir $W(z - 1)$ Ohm dem Instrument vorzuschalten, wobei die Angaben des Instrumentes mit z zu multiplizieren sind.

5. Beispiel. Ein Widerstand, der zu Meßzwecken verwendet werden soll, hat 1,013 Ohm. Es soll ein dünner Draht parallel geschaltet werden, damit der Ersatzwiderstand 1 Ohm beträgt. (Justierung eines Widerstandes).

Wieviel Ohm muß der Nebenschlußwiderstand haben?

Die Formel für den Ersatzwiderstand zweier paralleler Widerstände lautet:

$$W = \frac{w_1 \cdot w_2}{w_1 + w_2}.$$

Es ist: $w_1 = 1{,}013$ Ohm; es soll sein: $W = 1$ Ohm.

Aus obiger Gleichung folgt:

$$w_2 = \frac{W \cdot w_1}{w_1 - W}$$

$$= \frac{1 \cdot 1{,}013}{1{,}013 - 1} = \frac{1{,}013}{0{,}013} = 77{,}9 \text{ Ohm}.$$

Es ist ein Widerstandsdraht von 77,9 Ohm parallel zu schalten.

§ 35. Das Leitvermögen.

Das Leitvermögen ist der reziproke Wert des Widerstandes. Legen wir Drähte nacheinander an die Pole einer Stromquelle, deren Spannung für die in Frage kommenden Ströme praktisch konstant bleibt, so sind die Ströme umgekehrt proportional zum Widerstand der Drähte oder direkt proportional zum Leitvermögen. Diese direkte Proportionalität läßt bei Stromverzweigungen das Rechnen mit dem Leitvermögen bequemer erscheinen. Bezeichnen wir das Leitvermögen eines Drahtes mit A und den Widerstand mit w, so gilt:

$$A = \frac{1}{w};$$

numerieren wir zwei Drähte und ihre zugehörigen Größen, wobei E die Spannung und i den Strom bedeutet, so ist:

mit dem Widerstand gerechnet:	mit dem Leitvermögen gerechnet:
$i_1 = \frac{E}{w_1}$,	$i_1 = E \cdot A_1$,
$i_2 = \frac{E}{w_2}$;	$i_2 = E \cdot A_2$.

Legen wir die beiden Drähte zugleich an die beiden Pole, so ist der Gesamtstrom dieser Verzweigung:

$$I = i_1 + i_2,$$

$$I = \frac{E}{w_1} + \frac{E}{w_2} = E\left(\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}\right) \qquad I = E A_1 + E A_2 = E(A_1 + A_2)$$

und das Verhältnis der Ströme:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{\frac{1}{w_1}}{\frac{1}{w_2}} \qquad \frac{i_1}{i_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

für die ganze Verzweigung gilt, wenn mit R der Ersatzwiderstand und mit A_R das Ersatz-Leitvermögen bezeichnet wird:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \qquad A_R = A_1 + A_2$$

oder für drei Zweige:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} \qquad \Big| \qquad \Lambda_R = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3;$$

das heißt in Worten:

Die Ströme in nebeneinandergeschalteten Drähten verhalten sich direkt wie die Leitvermögen.

Das Ersatz-Leitvermögen einer Verzweigung ist gleich der Summe der Leitvermögen der einzelnen Zweige.

Unter dem spezifischen Leitvermögen (λ) ist der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes (c) eines Materiales zu verstehen:

$$\lambda = \frac{1}{c}.$$

Die häufigst vorkommende Zahl dieser Art ist das spezifische Leitvermögen des käuflichen Leitungskupfers; sie beträgt (vgl. Tabelle unter E des § 32):

$$\lambda_{Cu} = 57.$$

§ 36. Die Wheatstonesche[Hist. 36]) Brücke.

In sämtlichen Stromläufen einer Verzweigung tritt derselbe Potentialabfall auf. Wenn wir bei Vorhandensein zweier Stromläufe einen Spannungsmesser nacheinander so anlegen, wie es die gerissenen Linien in Fig. 39 andeuten, so sind beispielsweise die in der Figur angegebenen Voltzahlen ablesbar. Dabei können die Drähte der beiden Zweige ungleiche Ohmzahl haben; jeder einzelne Draht besitze zunächst überall gleichen Querschnitt und gleiches Material. Bringen wir nun, so wie es Fig. 40

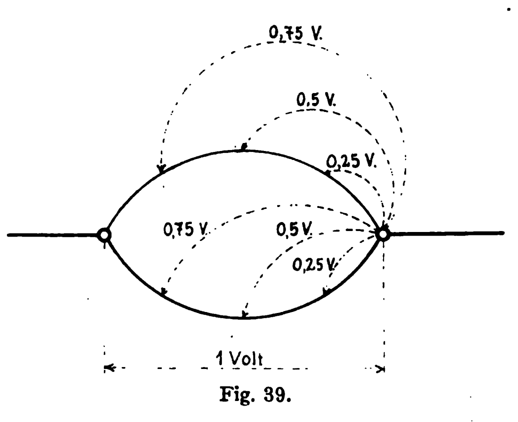


Fig. 39.

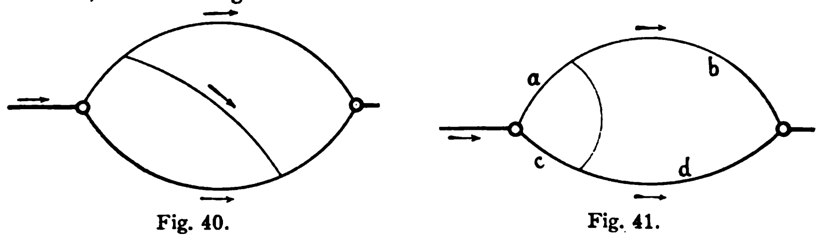


Fig. 40. Fig. 41.

und 41 zeigt, einen weiteren Draht, eine Brücke, zwischen zwei Punkte der Verzweigung, so wird dieser Draht in den meisten Fällen (Fig. 40)

von Strom durchflossen; nur in dem Falle, daß zwischen den vier Drahtlängen die Gleichung besteht (Fig. 41):

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d},$$

ist der Verbindungsdraht stromlos.

In diesem Falle sind zwei Punkte miteinander verbunden, zwischen denen keine Spannung vorhanden ist, oder, was dasselbe heißt, die gleiches Potential haben. Bei beliebigen Drähten aus beliebigem Material treten an Stelle der vier Längen die zugehörigen Widerstände: für Stromlosigkeit der Brücke muß sein:

$$\frac{w_a}{w_b} = \frac{w_c}{w_d}.$$

Diese Anordnung wird zum Messen von Widerständen verwendet gemäß dem Schema der Fig. 42. Ein dünner Draht von überall möglichst gleichem Durchmesser und homogenem Material ist über einen Maßstab zwischen zwei Klemmen gespannt (der Meßdraht). Ihm parallel liegt ein bekannter Widerstand mit der Ohmzahl w und ein unbekannter mit der Ohmzahl x in Hintereinanderschaltung. Zwischen x und w zweigt die Brücke ab, in der ein feiner Strommesser liegt, und die an einem Schleifkontakt am Meßdraht endigt. Der Schleifkontakt wird am Meßdraht so weit verschoben, bis der Ausschlag am Instrument gleich Null ist. Alsdann gilt mit den Bezeichnungen der Fig. 42:

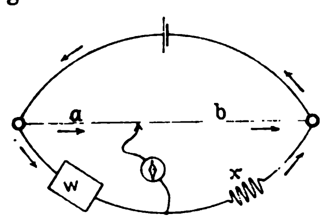


Fig. 42. Wheatstonesche Schaltung.

$$\frac{w}{x} = \frac{a}{b} \quad \text{oder} \quad x = w \cdot \frac{b}{a},$$

wobei bedeutet: a = Anzahl der mm auf der Seite von w,
b = „ „ „ „ „ „ „ x;

w wird schätzungsweise nahe der Ohmzahl x eingestellt, d. h. bei den Messungen muß der Schleifkontakt nahe der Mitte stehen. Damit Fehler im Meßdraht auf das Ergebnis nicht einwirken, vertauscht man w und x, wobei auch gegen Fig. 42 Strecke b links und a rechts zu liegen kommt, und rechnet x als das Mittel aus der zweiseitigen Messung.

Beispiel. In der Schaltung nach Fig. 42 hat man Stromlosigkeit der Brücke gefunden, während der Schleifkontakt auf 45,3 cm und nach Vertauschung auf 54,2 cm, von links her gerechnet, steht, bei einem bekannten Widerstande $w = 100$ Ohm und einer Gesamtlänge des Meßdrahtes von 100 cm.

Wie groß ist der zu messende Widerstand x?

1. Die Länge a ist gefunden zu 45,3 cm; die Länge b ergibt sich demnach zu 100 — 45,3 = 54,7 cm.

Demnach wäre $x = w \cdot \frac{b}{a} = 100 \cdot \frac{54,7}{45,3} = 120,7$ Ohm.

2. Die Länge b ist gefunden zu 54,2 cm; die Länge a ergibt sich demnach zu 100 — 54,2 = 45,8 cm.

Demnach wäre $x = w \cdot \frac{b}{a} = 100 \cdot \frac{54,2}{45,8} = 118,3$ Ohm.

3. Als Mittel folgt: $x = \frac{120,7 + 118,3}{2} = 119,5$ Ohm.

§ 37. Die Stromwärme und das Joulesche Gesetz, Arbeit und Leistung des Stromes.

A. Versuche.

Eine Drahtspirale, deren Widerstand w heißen soll, ist in einem Glaskolben eingeschlossen. Sie kann ausgewechselt werden gegen eine solche von der Ohmzahl $2w$ und eine dritte $3w$. Das Innere des

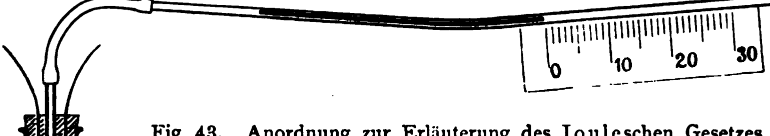


Fig. 43. Anordnung zur Erläuterung des Jouleschen Gesetzes.

Kolbens steht in Verbindung mit einem auf der anderen Seite offenen, im wesentlichen wagerechten, leicht geknickten Glasrohr, in dem sich ein gefärbter Alkoholfaden bewegen kann. Die Anordnung zeigt Fig. 43. Der Kolben ist gegen Wärmeabgabe so viel wie möglich geschützt. Die Temperatur eines Körpers, hier der eingeschlossenen Luft unter konstantem Druck, steigt proportional zur aufgenommenen Wärmemenge. Nach dem Gay-Lussacschen Gesetz ist die Volumendifferenz einer Gasmenge unter konstantem Druck proportional zur Temperaturdifferenz, und es folgt daraus: die Bewegung des Alkoholfadens zwischen einer Anfangs- und Endstellung ist direkt proportional zur vom Kolbeninneren aufgenommenen Wärmemenge.

Wir schicken in dem vorliegenden Versuchsbeispiel durch die Widerstände w, $2w$ und $3w$ der Reihe nach verschiedene Ströme verschiedene Zeiten hindurch und erhalten die Fadenbewegungen:

a) Widerstand w:

	bei 1 Ampere	bei 2 Ampere	bei 3 Ampere
in 10 Sek.	10 mm	40 mm	90 mm
„ 20 „	20 „	80 „	180 „
„ 30 „	30 „	120 „	270 „

b) Widerstand $2w$:

	bei 1 Ampere	bei 2 Ampere	bei 3 Ampere
in 10 Sek.	20 mm	80 mm	180 mm
„ 20 „	40 „	160 „	
„ 30 „	60 „	240 „	

c) Widerstand $3w$:

	bei 1 Ampere	bei 2 Ampere	bei 3 Ampere
in 10 Sek.	30 mm	120 mm	270 mm
„ 20 „	60 „	240 „	
„ 30 „	90 „		

Diese Versuchsreihe zeigt, daß wir die Wärmemenge
1) mit der Zeit des Stromdurchgangs proportional
2) mit dem Widerstand . . . . „
3) mit dem Quadrat des Stromes . „ erhalten.

B. Verallgemeinerung.

Die von Joule[Hist. 32]) entdeckte Gesetzmäßigkeit zwischen Wärmemenge, Strom, Widerstand und Zeit hat für beliebige Fälle die Form:

$$Q = i^2 \cdot w \cdot t \text{ (Joulesches Gesetz)},$$

wobei folgende Bezeichnungen gelten:

Q = Wärmemenge (in Joule),
i = Stromstärke (in Ampere),
w = Widerstand (in Ohm),
t = Zeit des Stromdurchgangs (in Sekunden).

Unter „1 Joule" verstehen wir die elektrotechnische Einheit der Wärmemenge; sie ist unter Berufung auf bereits bekannte Einheiten diejenige Wärmemenge, die in einem Widerstand von 1 Ohm durch 1 Ampere in 1 Sekunde entwickelt wird. Mit der technischen Einheit der Wärmemenge (der Kalorie) steht sie in der Beziehung:

$$4160 \text{ Joule} = 1 \text{ Kalorie}.$$

So folgt weiter mit gleichen Bezeichnungen wie oben:

$$Q_{\text{Kal.}} = \frac{1}{4160} \cdot i^2 \cdot w \cdot t = 0{,}00024 \cdot i^2 \cdot w \cdot t.$$

Da eine Wärmemenge stets gleichwertig einer mechanischen Arbeit ist (1 Kalorie = 424 mkg), gilt außerdem:

$$A_{\text{mkg}} = \frac{424}{4160} \cdot i^2 \cdot w \cdot t = \frac{1}{9{,}81} \cdot i^2 \cdot w \cdot t, \text{ oder } 1 \text{ mkg} = 9{,}81 \text{ Joule}.$$

Aus der Kombination des Ohmschen Gesetzes $E = i \cdot w$ mit dem Jouleschen Gesetz $Q = i^2 \cdot w \cdot t$ folgt:

$$Q_{\text{Joule}} = E \cdot i \cdot t;$$

dabei bedeutet: E = Spannung an den Enden eines Widerstandes (Volt),
i = Strom in diesem Widerstand (Ampere),
t = Zeit des Stromdurchgangs (Sekunden),
und weiter gilt mit sonst gleichen Bezeichnungen:

$$Q_{\text{Kal.}} = 0{,}00024 \cdot E \cdot i \cdot t \quad \text{und} \quad A_{\text{mkg}} = \frac{1}{9{,}81} \cdot E \cdot i \cdot t.$$

Diese letzte Beziehung lehrt uns, um nochmals auf den Vergleich zwischen Wasser und Elektrizität zurückzukommen, daß die sich gegenseitig entsprechenden Größen:

Druckhöhe (H) (in m)	Spannung (E) (in Volt)
Wasserstromstärke (j) (in kg/Sek.)	Stromstärke (i) (in Ampere)

in ihrem Produkt in beiden Fällen eine und dieselbe physikalische Größe, nämlich eine Leistung ergeben; es beträgt die Arbeit:

$$A_{\text{mkg}} = (H \cdot j) \cdot t; \qquad A_{\text{mkg}} = \frac{1}{9{,}81} \cdot (E \cdot i)\, t;$$

beziehen wir in einem folgegleichen Zustand die Arbeiten auf die Zeiteinheit, so erhalten wir den Ausdruck der Leistungen:

$$L_{\text{mkg/Sek.}} = H \cdot j; \qquad L_{\text{mkg/Sek.}} = \frac{1}{9{,}81} \cdot E \cdot i;$$

$$L_{\text{Joule/Sek.}} = E \cdot i.$$

Dieselbe Leistung, die in sekundliche Wärme umgesetzt als „1 Joule/Sek." bezeichnet wird, führt in allen Fällen, also auch wenn chemische oder mechanische Leistung auftritt, zu Ehren des James Watt die Maßbezeichnung „1 Watt". Somit beträgt die Leistung:

$$L_{\text{Watt}} = E \cdot i;$$

oder in Worten: multipliziert man an einem Stromlauf die Stromstärke (in Ampere) und die an den Enden des betrachteten Stromlaufes gleichzeitig auftretende Spannung (in Volt), so erhält man die an diesem Stromlauf auftretende Leistung (in Watt).

Das Watt ist die Einheit der Leistung, und wir verstehen darunter die Leistung, die auftritt, wenn zwischen 2 Punkten, zwischen denen 1 Volt Spannung liegt, der Strom 1 Ampere fließt. 736 Watt (= 75 · 9,81) sind gleichwertig einer Pferdestärke. 1000 Watt heißen 1 Kilowatt (KW).

Größere Arbeiten werden gemessen in Kilowattstunden (KWSt), kleinere in Wattsekunden. Eine Wattsekunde ist dieselbe Arbeitsmenge wie ein Joule. Die Maßbezeichnung Joule ist nur da richtig, wo die elektrische Arbeit in Wärme umgesetzt wird (im Gegensatz zu chemischer oder mechanischer Arbeit usw.), während die Maßbezeichnung Wattsekunden allgemein gilt.

1. Beispiel. Wieviel Watt treten bei einer normalen Glühlampe für 110 Volt auf, die von 0,5 Ampere durchflossen wird? Wieviel Joule, Kalorien und mkg beansprucht diese Lampe in der Stunde?

Die Leistung wird erhalten zu:

$$L_{\text{Watt}} = E \cdot i = 110 \cdot 0{,}5 = 55 \text{ Watt.}$$

Die Wärmemenge in der Stunde wird erhalten zu:

$$Q_{\text{Joule}} = E \cdot i \cdot t = 110 \cdot 0{,}5 \cdot 3600 = 198000 \text{ Joule}$$

oder:

$$Q_{\text{Kal.}} = \frac{1}{9{,}81 \cdot 424} \cdot 198000 = 47{,}6 \text{ Kalorien;}$$

die mechanische Arbeit ergibt sich:

$$A_{\text{mkg}} = \frac{1}{9{,}81} \cdot 198000 = 20183 \text{ mkg.}$$

2. Beispiel. Eine Spule, deren Kupfergewicht $P = 0{,}2$ kg und deren Widerstand $w = 1{,}5$ Ohm beträgt, soll kurze Zeit hindurch von einem starken Strom durchflossen werden, den sie auf Dauer nicht verträgt. Die entwickelte Wärmemenge soll vom Kupfer der Spule aufgenommen werden. Die Ausgangstemperatur betrage $\tau_1 = 15$ Grad, die höchst zulässige Temperatur $\tau_2 = 85$ Grad. Wie lange darf ein Strom von $i = 30$ Ampere in dieser Spule fließen, wenn die spezifische Wärme des Kupfers zu $\sigma = 0{,}093$ gerechnet wird?

Die von der Spule aufnehmbare Wärmemenge ist:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Kal.}} &= \text{Kupfergewicht (kg)} \cdot \text{Temperaturerhöhung (Grad)} \cdot \text{spez. Wärme} \\ &= P \cdot (\tau_2 - \tau_1) \cdot \sigma \\ &= 0{,}2 \cdot (85 - 15) \cdot 0{,}093 = 1{,}303 \text{ Kalorien;} \end{aligned}$$

aus $Q_{\text{Kal.}} = 0{,}00024 \cdot i^2 \cdot w \cdot t$ folgt die zulässige Zeit des Stromdurchganges:

$$t = \frac{Q_{\text{Kal.}}}{0{,}00024 \cdot i^2 \cdot w} = \frac{1{,}303}{0{,}00024 \cdot 30^2 \cdot 1{,}5} = 4{,}02 \text{ Sekunden.}$$

3. Beispiel. Bei einem Straßenbahnwagen sollen in 1 Stunde 1000 Kalorien durch einen Strom entwickelt werden, der von $E = 500$ Volt entnommen wird. Wieviel Ampere braucht die Heizung und wie groß ist die erforderliche Ohmzahl des Heizwiderstandes? Wieviel kostet die Heizung stündlich, wenn für 1 KWSt. 10 Pf. bezahlt werden?

Aus $Q_{\text{Kal.}} = 0{,}00024 \cdot E \cdot i \cdot t$ folgt der erforderliche Strom:

$$i = \frac{Q_{\text{Kal.}}}{0{,}00024 \cdot E \cdot t} = \frac{1000}{0{,}00024 \cdot 500 \cdot 3600} = 2{,}32 \text{ Ampere.}$$

Der erforderliche Widerstand bestimmt sich aus dem Ohmschen Gesetz:

$$w = \frac{E}{i} = \frac{500}{2{,}32} = 215{,}5 \text{ Ohm.}$$

Die für die Heizung aufgewendete Leistung beträgt:

$$L = E \cdot i = 500 \cdot 2{,}32 = 1160 \text{ Watt} = 1{,}16 \text{ KW},$$

daher kostet die Heizung für eine Stunde: $1{,}16 \cdot 10 = 11{,}6$ Pf.

4. Beispiel. Eine Beleuchtungsanlage erfordert bei $E = 110$ Volt einen Strom $i = 30$ Ampere. Wieviel Pferdestärken entsprechen dieser Leistung?

Die Leistung beträgt:

$$L_{\text{Watt}} = E \cdot i = 110 \cdot 30 = 3300 \text{ Watt},$$

$$L_{\text{PS.}} = \frac{L_{\text{Watt}}}{736} = \frac{3300}{736} = 4{,}48 \text{ PS.}$$

5. Beispiel. Von einer Zentrale aus, deren Spannung $E_1 = 550$ Volt beträgt, sollen an einen entfernten Motor $L_2 = 48$ PS. abgegeben

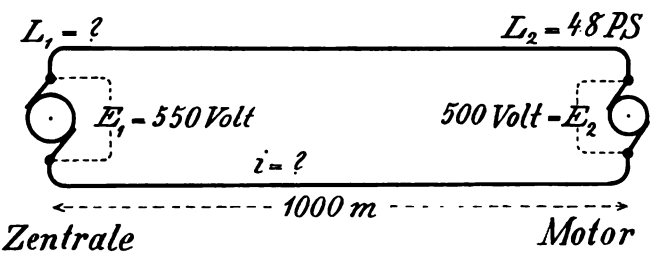


Fig. 44. Schema einer Übertragung.

werden, und zwar so, daß die Spannung am Motor $E_2 = 500$ Volt betragen möge. Die einfach gemessene Streckenlänge der Leitung sei 1 km. Wie groß muß der Querschnitt der Kupferleitung sein? Wie viel PS. treten am Ausgangspunkt der Leitung auf? Wie groß ist der Wirkungsgrad der Leitung? (Vgl. Fig. 44.)

Es ergibt sich:

Die Stromstärke:

$$i = \frac{L_{2\,\text{Watt}}}{E_{2\,\text{Volt}}} = \frac{48 \cdot 736}{500} = 70{,}8 \text{ Ampere.}$$

Der Widerstand der Leitung:

$$w = \frac{E_1 - E_2}{i} = \frac{550 - 500}{70{,}8} = 0{,}706 \text{ Ohm.}$$

Der Querschnitt der Leitung:

$$q = \frac{l}{w} \cdot c = \frac{2 \cdot 1000}{0{,}706 \cdot 57} = 49{,}7 \sim 50 \text{ qmm.}$$

Die Leistung am Ausgangspunkt der Leitung:

$$L_{1\,\text{PS.}} = E_1 \cdot i \cdot 736 = 550 \cdot 70{,}8 \cdot 736 = 52{,}9 \text{ PS.}$$

Der Wirkungsgrad der Leitung:

$$\eta = \frac{L_2}{L_1} = \frac{48_{\text{PS.}}}{52{,}9_{\text{PS.}}} = 0{,}91.$$

In dem Ausdruck $\eta = \frac{L_2}{L_1} = \frac{(E_2 \cdot i)_{\text{Watt}}}{(E_1 \cdot i)_{\text{Watt}}}$ hebt sich die Stromstärke fort, daraus folgt: in hintereinandergeschalteten Teilen einer Anlage verhalten sich die Leistungen zwischen zwei **Punkten** des Stromlaufes wie die Spannungen. Also hätte η auch sofort bestimmt werden können:

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{500}{550} = 0{,}91.$$

6. Beispiel. Für feuersicher verlegte, luftumspülte blanke Widerstandsmaterialien rechnet man für die abkühlende Oberfläche bei Dauerbelastung auf 1 qcm rund 1 Watt. Wieviel Strom verträgt mit dieser Bedingung ein Nickelindraht von 2 mm Durchmesser und ein Nickelinband des gleichen Querschnittes von 0,3 mm Dicke?

Es beträgt:

Der Widerstand für beide Fälle auf 1 m Länge:

$$w = \frac{l}{q} \cdot c = \frac{1}{2_2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 0{,}5 = 0{,}1592 \text{ Ohm}.$$

Der Umfang des Drahtes:

$$u_{\text{Dr}} = 2\pi = 6{,}283 \text{ mm} = 0{,}6283 \text{ cm}.$$

Die Oberfläche des Drahtes auf 1 m Länge:

$$O_{\text{Dr}} = 0{,}6283 \cdot 100 = 62{,}83 \text{ qcm}.$$

Die aufnehmbare Leistung auf 1 m Länge des Drahtes:

$$L_{\text{Dr}} = 62{,}83 \text{ Watt} = i_{\text{Dr}}^2 \cdot w.$$

Der höchstzulässige Strom für den Draht:

$$i_{\text{Dr}} = \sqrt{\frac{L_{\text{Dr}}}{w}} = \sqrt{\frac{62{,}83}{0{,}1592}} = 19{,}9 \text{ Ampere}.$$

Die Breite des Bandes:

$$b = \frac{d_{\text{Dr}}^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0{,}3} = 10{,}5 \text{ mm}.$$

Der Umfang des Bandes:

$$u_{\text{B}} = 2{,}1 \text{ cm}.$$

Die Oberfläche des Bandes auf 1 m Länge:

$$O_{\text{B}} = 2{,}1 \cdot 100 = 210 \text{ qcm}.$$

Die aufnehmbare Dauerleistung auf 1 m Länge des Bandes:

$$L_{\text{B}} = 210 \text{ Watt} = i_{\text{B}}^2 \cdot w.$$

Der höchstzulässige Strom für das Band:

$$i_B = \sqrt{\frac{L_B}{w}} = \sqrt{\frac{210}{0,1592}} = 36,8 \text{ Ampere.}$$

7. Beispiel. Für Spulen mit baumwollisolierten Drähten rechnet man als abkühlende Oberfläche bei Dauerbelastung für die luftumspülten Flächen auf 10 qcm rund 1 Watt. Wieviel Strom verträgt mit dieser Bedingung eine Spule von 50 mm Außendurchmesser und 90 mm axialer Länge von $w = 0,101$ Ohm, wenn die Mantelfläche der Spule allein zur Kühlung in Rechnung gezogen werden soll? (Vgl. Bsp. 5 von § 32).

Die Oberfläche der Spule beträgt: $5 \cdot \pi \cdot 9 = 141$ qcm, daher wird die zulässige Leistung $L = 0,1 \cdot 141 = 14,1$ Watt und der höchste zulässige Strom $i = \sqrt{\frac{L}{w}} = \sqrt{\frac{14,1}{0,101}} = 11,8$ Ampere.

8. Beispiel. Ein Wasserlauf von $h = 8$ m Abfall zwischen Oberwasser- und Unterwasserspiegel führt $j = 4000$ kg Wasser in der Sekunde. Wieviel Glühlampen zu je 50 Watt können mit dieser Wasserkraft betrieben werden, wenn der Wirkungsgrad der ganzen Anlage $\eta = 0,55$ beträgt?

Im Wasser ist die Leistung enthalten:

$$L_1 = h \cdot j \cdot 9,81 = 8 \cdot 4000 \cdot 9,81 = 313920 \text{ Watt.}$$

Die entnehmbare Nutzleistung ist:

$$L_2 = L_1 \cdot \eta = 313920 \cdot 0,55 = 172656 \text{ Watt.}$$

Die Anzahl der Glühlampen beträgt:

$$z = \frac{L_2}{50} = \frac{172656}{50} = 3453 \text{ Lampen.}$$

---

6. Kapitel.

Leitungen und Zubehör.

§ 38. Grundsätze für die Übertragung.

A. Bei Freiheit in der Wahl des Spannungsverlustes.

Je mehr Spannung in einer Leitung verbraucht werden darf, um so geringer wird bei sonst gleichen Verhältnissen der Querschnitt. Es folgt aus den Ausdrücken:

$$w = \frac{e_v}{i} \text{ und } w = \frac{l}{q} \cdot c \text{ die Formel: } q = \frac{l\,i\,c}{e_v},$$

q = Leitungsquerschnitt (qmm),
l = Gesamtlänge des Stromweges in der Leitung (m),
i = Stromstärke (Ampere),
c = spez. Widerstand des Leitungsmateriales (1/57 für Kupfer).
e_v = Spannungsverlust in der Leitung (Volt) beim Strome i.

Das Produkt $l \cdot i$ heißt die Anzahl der Meterampere, und es folgt die direkte Proportionalität des Leitungsquerschnittes zu dieser Zahl, falls für alle Fälle ein bestimmter Spannungsverlust gerechnet wird. So z. B. hat man für 1 Volt Spannungsverlust bei Kupfer nur die Meterampere durch 57 zu dividieren, um den Querschnitt zu erhalten.

Ist eine bestimmte Anzahl Meterampere zu übertragen, so ist der Leitungsquerschnitt umgekehrt proportional zum Spannungsverlust.

1. Beispiel. Das 7. Beispiel von § 32 ergab bei 6 Ampere auf 56 m Leitungsstrecke bei 1,2 Volt Spannungsverlust 9,824 qmm Querschnitt der Kupferleitung. Wie groß ist der Querschnitt für dieselbe Übertragung erforderlich, wenn

$$\text{a) } e_{va} = 0{,}6 \quad \text{und} \quad \text{b) } e_{vb} = 2{,}4 \text{ Volt}$$

Spannungsverlust auftreten sollen?

$$\text{a) } q_a = \frac{lic}{e_{va}} = \frac{2 \cdot 56 \cdot 6}{0{,}6} \cdot \frac{1}{57} = 19{,}648 \text{ qmm}$$

$$\text{b) } q_b = \frac{lic}{e_{vb}} = \frac{2 \cdot 56 \cdot 6}{2{,}4} \cdot \frac{1}{57} = 4{,}912 \text{ qmm.}$$

Es ist ersichtlich, wenn nichts anderes dagegenspricht, so muß der Spannungsverlust möglichst hoch gewählt werden, damit die Leitung billig wird.

B. Die Freiheit in der Wahl des Spannungsverlustes wird begrenzt:

a) Durch das Erfordernis wirtschaftlicher Betriebe:

Das Produkt aus Stromstärke und Spannung ergibt die Leistung. Das Produkt aus Stromstärke und verlorener Spannung ergibt die verlorene Leistung. Die Leistung wird durch Kostenaufwand erzeugt. Bei größerem Spannungsverlust einer Leitung folgt aus der Verbilligung des Leitungsmateriales eine Verteuerung des Betriebes.

In der Technik wird, wenn nichts anderes dagegenspricht, gefragt: Wie werden die Gesamtkosten eines Betriebes am geringsten?

Bei einer Leitung bestehen die laufenden Kosten hauptsächlich aus der Verzinsung des Kupfers und aus den Selbstkosten der verlorenen Arbeit. Bei welchem Spannungsverlust der Betrieb am billigsten ist, erfahren wir durch eine Rechnung nach dem folgenden Beispiel.

2. Beispiel. Es sind von 100 Volt aus auf eine Entfernung von 500 m einfach gemessener Streckenlänge der Leitung 20 Ampere zu übertragen. Die Kosten für 1 kg Leitungskupfer sollen mit 2 *M*, die Selbsterzeugungskosten für die Kilowattstunde mit 8 *Pf* in Rechnung

gesetzt werden. Das spezifische Gewicht des Kupfers gelte zu 9,0. Bei welchem Spannungsverlust werden die Gesamtkosten des Betriebes ein Geringstwert, wenn für das Leitungskupfer jährlich 4 $^0/_0$ Verzinsung, und wenn für die Anlage jährlich ein 1200stündiger Betrieb gerechnet werden soll?

Es werden der Reihe nach verschiedene Spannungsverluste angenommen, und es ergeben sich daraus folgende Werte:

Spannungsverlust e Volt	Leitungsquerschnitt q qmm	Kupferkosten ℳ	Verzinsung ℳ jährlich	Leistungsverlust Watt	Arbeitsverlust KWSt. jährlich	Kosten des Arbeitsverlustes. ℳ jährlich	Summa ℳ jährlich
2	176	3168	126,72	40	48	3,84	130,56
4	88	1584	63,36	80	96	7,68	71,04
8	44	792	31,68	160	192	15,36	47,04
16	22	396	15,84	320	384	30,72	46,56
32	11	198	7,92	640	768	61,44	69,36

Die gefundenen Werte in ein Achsenkreuz nach Fig. 45 eingetragen und durch Schaulinien verbunden geben eine Vorstellung über die Abhängigkeit der Betriebskosten von dem Spannungsverlust und zeigen bei der Summenkurve in diesem Fall einen Geringstwert zwischen 11 und 12 Volt, oder, da wir von 100 Volt ausgehen, zwischen 11 und 12 $^0/_0$ Verlust. Der Spannungsverlust, der die geringsten Betriebskosten ergibt, heißt der wirtschaftliche Spannungsverlust. Er liegt im Mittel bei ausgeführten Anlagen in der Nähe von 10 $^0/_0$. Der mit diesem Spannungsverlust zu-

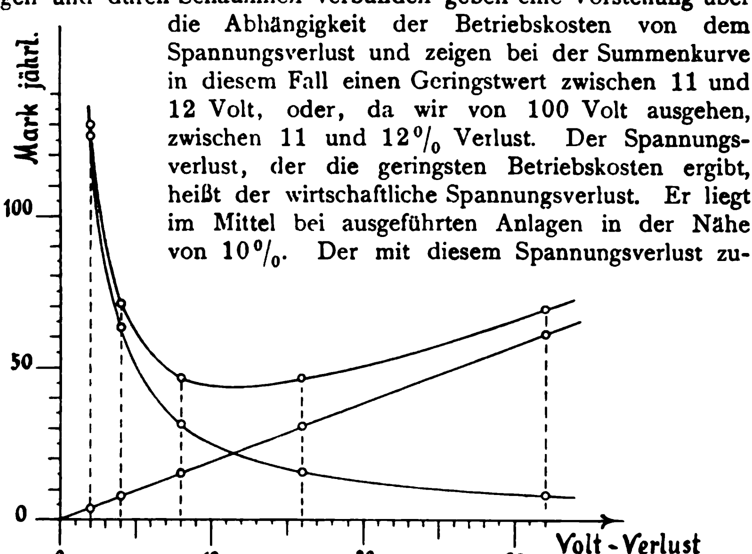


Fig. 45. Schaulinien für die jährlichen Übertragungskosten.

sammengehörige Wirkungsgrad der Übertragung heißt der wirtschaftliche Wirkungsgrad. Also man wird, wenn nichts anderes dagegenspricht, den hier angedeuteten Übertragungsverhältnissen nahezukommen suchen.

b) Durch die Glühlampen:

Die Glühlampen einer Anlage werden parallelgeschaltet. Die

Parallelschaltung ist unmittelbar gegeben durch die Spannungs- und Stromverhältnisse der Glühlampen, durch die Möglichkeit nach Belieben Lampen zu- und abschalten zu können und durch die einfachen Betriebsverhältnisse, die aus der Parallelschaltung erwachsen, da nur die Spannung zwischen den Leitungen konstant gehalten zu werden braucht, wobei sich die Stromstärke je nach dem Lichtbedarf von selbst einstellt. Bei den Kohleglühlampen, die den größten Teil der Belastung der meisten Zentralen ausmachen, ändert sich die Lichtstärke sehr bedeutend mit geringen Veränderungen der Spannung. Erfahrungsgemäß läßt man bei Beleuchtungsanlagen 2 Prozent Spannungsänderung zu. Durch diese Forderung wird zunächst die Möglichkeit genommen, die Vorteile eines größeren (des in a erwähnten wirtschaftlichen) Spannungsverlustes auszunutzen. Liegen an einer Leitung eine Anzahl von Lampen, etwa nach dem Schema der Fig. 46, so muß bei Einschaltung aller Lampen der Verlust von der Stromquelle bis zur letzten Lampe sich innerhalb der $2\,^0/_0$ befinden, also man wird nicht vorn 120-Volt-Lampen und am Ende der Leitung 100-Volt-Lampen benutzen, denn es kommt auch vor, daß die letzte Lampe allein brennt, und in diesem Fall würde die 100-Volt-Lampe nahezu 120 Volt bekommen und verderben.

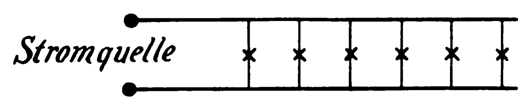


Fig. 46. Parallelgeschaltete Glühlampen.

Die Forderung von $2\,^0/_0$ Spannungsverlust am Ende der Leitung führt bei Beleuchtungsanlagen zu teueren Leitungen.

C. Bei Freiheit in der Wahl der Spannung.

Soll eine bestimmte Leistung mit einem bestimmten Wirkungsgrad übertragen werden, so werden die Kupferkosten um so geringer, je höher die Spannung der Anlage gewählt wird. Wählen wir an Stelle einer 100-Volt-Anlage eine solche von 200 Volt, so brauchen wir gemäß dem Ausdruck:

Leistung = Spannung × Stromstärke

nun für die gleiche Leistung den halben Strom. Die für die Leitung verwendbare Spannung erhält unter Voraussetzung desselben Wirkungsgrades nun den doppelten Wert. Gegen den Ausdruck:

$$q = \frac{l i c}{e_v} \quad \text{bei 100 Volt}$$

erhalten wir nun:

$$q' = \frac{l \cdot i' \cdot c}{e'_v} = \frac{l \cdot \frac{i}{2} \cdot c}{2\, e_v} = \frac{l i c}{4 e_v} \quad \text{bei 200 Volt,}$$

d. h. wir kommen bei Verdoppelung der Spannung mit $^1/_4$ des Querschnittes aus. Allgemein gilt:

$$q = \frac{l \cdot L_1 \cdot c}{E_1^2 (1 - \eta)} \quad \text{oder} \quad q = \frac{l \cdot L_2 \cdot c}{E_2^2 \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)}.$$

q = Leitungsquerschnitt (qmm)
l = Gesamtlänge des Stromweges in der Leitung (m).
L_1 = Leistung am Ausgangspunkt der Leitung (Watt),
E_1 = Spannung „ „ „ „ (Volt),
L_2 = Leistung „ Endpunkte „ „ (Watt),
E_2 = Spannung „ „ „ „ (Volt),
η = Wirkungsgrad der Übertragung.

Die Betrachtung lehrt, daß bei sonst gleichen Verhältnissen der Leitungsquerschnitt dem Quadrat der Spannung umgekehrt proportional ist. Man wird, wenn nichts anderes entgegensteht, die Spannung der Übertragung möglichst hoch wählen, damit die Anlage möglichst billig wird.

D. Die Freiheit in der Wahl der Spannung wird begrenzt:

a) Durch die Gefahr elektrischer Betriebe.

Es darf ein zu starker Strom den menschlichen Körper nicht durchfließen, vor allem nicht das Rückenmark. Daher ist es zu vermeiden, daß man mit der einen Hand den ersten, mit der anderen Hand den zweiten Pol berührt. Der Strom übt auf den Körper der Lebewesen eine Wirkung aus,* die sich in einem krampfhaften Zustand äußert, und die die Herrschaft über die willkürlichen Bewegungen, so auch über das Sprachvermögen nimmt und in besonderen Fällen auch dauernde Lähmung oder den Tod zur Folge hat. Die menschliche Hornhaut im trockenen Zustand ist ein schlechter Leiter und läßt daher nach dem Ohmschen Gesetz nur einen geringen Strom eintreten. Man rechnet für trockne Haut und leichte Berührung etwa mit einem Körperwiderstand von 10000 Ohm, und kann annehmen, daß bei einem Strom von etwa 0,025 Ampere eine Gefahr noch nicht besteht, so daß eine Spannung von $0{,}025 \cdot 10000 = 250$ Volt normalerweise nicht als lebensgefährlich angesehen wird. Ist die Haut mit elektrolytischen Flüssigkeiten (z. B. Schweiß, verdünnten Säuren, Färberei- und Gerbereilaugen) getränkt oder ist die Haut verletzt oder wird sie durch einen Lichtbogen verbrannt, so wird die Gefahr größer.

Aus den angegebenen Gründen wird die in die Häuser geleitete Gebrauchsspannung nicht höher als 250 Volt gewählt. Übliche Spannungen sind hierfür 100 bis 120 und 200 bis 240 Volt. Straßenbahnen arbeiten mit 500 bis 600 Volt. Anlagen über 250 Volt erfordern ganz besondere Sachkenntnis des Personales.

Bei Anwendung der modernen Hilfsmittel der Installation und bei Erfüllung anerkannter Regeln der Technik** ist das Gefahrengebiet

* Die physiologische Wirkung.
** Als solche gelten für uns die Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

elektrischer Anlagen geringer, als beispielsweise dasjenige des Leuchtgases, des Petroleums und der Streichhölzer.

b) Durch die Glühlampen.

Für die meisten Anlagen ist der Glühlampen wegen nicht das Bedürfnis nach höheren Gebrauchsspannungen vorhanden, als 250 Volt. Die Glühlampen werden, wie Abschnitt B, b dieses Paragraphen gezeigt hat, parallel geschaltet, und Glühlampen über 250 Volt sind schwierig herstellbar.

c) Durch die Grenze der Isolationsmöglichkeit.

Der Wechselstrom gestattet einen Ausweg zu höheren Spannungen. Man kann eine hohe Wechselspannung durch Induktionswirkungen auf eine niedere transformieren (und umgekehrt). Darüber soll hier nur das vorausgeschickt werden, daß den Transformatoren am Ende einer Leitung bei hoher Spannung ein schwacher Strom zugeschickt wird, während man dem Transformator eine niedrige Gebrauchsspannung bei starkem Strome entnehmen kann. Die abgenommene Leistung ist dabei nur wenig geringer, als die zugeführte. Wechselstromzentralen erzeugen an den Maschinen hohe Spannungen normal bis 5000, vereinzelt höher bis 20000 Volt, die über weite Strecken geleitet und im Bedarfsfalle transformiert wird. In der Transformationsmöglichkeit mit Hilfe stillstehender Einrichtungen besteht der Vorteil des Wechselstromes dem Gleichstrom gegenüber.

In seltenen Fällen werden für die Fortleitung Spannungen bis 60000 Volt verwendet, die durch Transformation von der Maschinenspannung aus hergestellt werden. Bei dieser Spannung liegt etwa die praktische Grenze der Isolationsmöglichkeit für Leitungen und Transformatoren.

Bei dem Hochspannungsteil kommt zur Bedienung nur sachkundiges Personal in Frage, während eine Hochspannungsgefahr am Niederspannungsteil bei gut ausgeführten Anlagen nicht besteht, also ist für Wechselstrom die Übertragung auf weite Strecken gelöst. Der Transformator ist eine stillstehende und Bedienung nicht erfordernde Einrichtung. Bei Gleichstrom kann nur mit laufenden Maschinen transformiert werden.

§ 39. Verteilungssysteme.

A. Die einfache Parallelschaltung.

Bei der Verteilung der Leistung über ein gewisses Bereich werden die einzelnen Verbrauchsstationen parallel angeschlossen, ebenso, wie die einzelnen Lampen an der Verbrauchsstelle. Für ein kleines Bereich entsteht daher ein Schaltungsschema, wie es Fig. 47 in einem Beispiel darstellt. Die Klemmen I und II sind die Klemmen der Elektrizitätsquelle. Die Spannung zwischen zwei Leitungsdrähten ist mit Vernachlässigung der Leitungsverluste überall dieselbe wie an der Zentrale. Man zweigt von diesen Leitungen jedesmal zwei Drähte dorthin ab, wo man die Leistung braucht. Wo die Wahl gelassen ist, legt man die Hauptstränge so, daß sie möglichst mitten durch

die Absatzgebiete hindurchgehen. In Fig. 47 sind die einzelnen nach dem Schema der Fig. 46 geschalteten Abnahmestellen durch kleine Kreise angedeutet. Die Zahlen der Ampere, welche beispielsweise an diesen Stellen verbraucht werden, sind in die Kreise eingeschrieben. Die Zentrale hat die Summe der Ampere zu liefern, die sich aus allen Verbrauchstellen ergibt. Zweigen von einer überall gleich starken Doppelleitung an verschiedenen Stellen die Ströme i_1, i_2, i_3 usw. ab, wozu vom Anfangspunkt der Leitung aus gemessen jedesmal die Strecken l_1, l_2, l_3 usw. (in m ausgedrückt) gehören, so berechnet sich der Gesamtspannungsverlust bis zu einer bestimmten Stelle nach den folgenden Angaben. Der Gesamtspannungsverlust ist gleich der Summe der Spannungsverluste der einzelnen Strecken. So ist z. B. für eine Leitung vom Querschnitt q nach Fig. 48 der Spannungsverlust e_v bis zum Abzweig von i_3 zu rechnen:

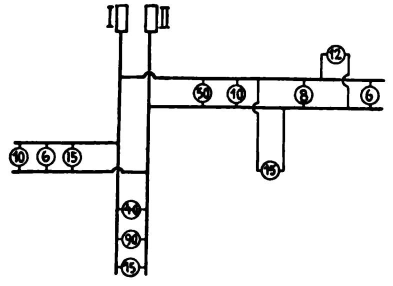


Fig. 47. Einfache Parallelschaltung der Verbrauchstellen.

Fig. 48. Einseitig gespeiste Doppelleitung mit 3 Abzweigstellen.

$$e_v = \frac{2 \cdot l_1 (i_1 + i_2 + i_3) \cdot c}{q} + \frac{2 \cdot (l_2 - l_1)(i_2 + i_3) \cdot c}{q} + \frac{2 \cdot (l_3 - l_2) \cdot i_3 \cdot c}{q}$$

$$= \frac{2 \cdot c}{q} (l_1 i_1 + l_2 i_2 + l_3 i_3);$$

diese Betrachtung läßt erkennen, daß die Meterampere hier eine Rolle spielen, wie die Biegungsmomente bei einem einseitig eingespannten Träger, und daher können die Untersuchungsmethoden der Momentenlehre ebenfalls auch auf die Leitungen übertragen werden. Hier treten nur an Stelle der Hebelarme die Leitungsstrecken und an Stelle der Kräfte die Ströme. So z. B. behandelt die folgende Aufgabe die Anwendung der zeichnerischen Methoden:

Beispiel. Vom Anfangspunkt einer Leitung aus zweigen in $l_1 = 20$, $l_2 = 52$ und $l_3 = 77$ m einfach gemessener Strecke die Ströme $i_1 = 5$, $i_2 = 15$ und $i_3 = 10$ Ampere ab. Wie stark muß die kupferne Doppelleitung sein, wenn der Spannungsverlust bis zum Abzweig von i_3 0,9 Volt betragen soll?

Man konstruiert die resultierenden Meterampere (entsprechend dem resultierenden Moment):

a) Nach Fig. 49 durch schrittweise erfolgendes Zusammennehmen von Strömen unter maßstäblicher Aufzeichnung und findet die abgreif-

bare Strecke l', an der die Summe der abzweigenden Ströme angreifen müßte, um denselben Spannungsverlust zu erhalten, zu 55 m; die Hälfte der zu übertragenden Meterampere beträgt daher:

$$l' \cdot (i_1 + i_2 + i_3) = 55 \cdot 30 = 1650 \text{ Meterampere.}$$

b) Nach Fig. 50 durch Anwendung eines Stromplanes (entsprechend dem Kräfteplan) und eines Streckenvielecks und findet die Hälfte der Meterampere durch Multiplikation des gewählten Polabstandes von $I'' = 20$ Ampere mit der abgreifbaren Strecke $l'' = 82{,}5$ m:

$$l'' \cdot I'' = 82{,}5 \cdot 20$$
$$= 1650 \text{ Meterampere.}$$

Der erforderliche Leitungsquerschnitt wird daher:

$$q = \frac{2 \cdot 1650}{0{,}9 \cdot 57} = 64{,}33$$
$$= \text{rund } 65 \text{ qmm.}$$

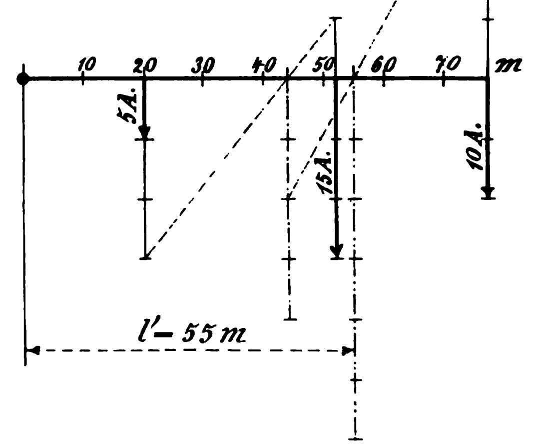


Fig. 49. Konstruktion der resultierenden Übertragungslänge.

An beliebigen Stellen senkrecht durch das

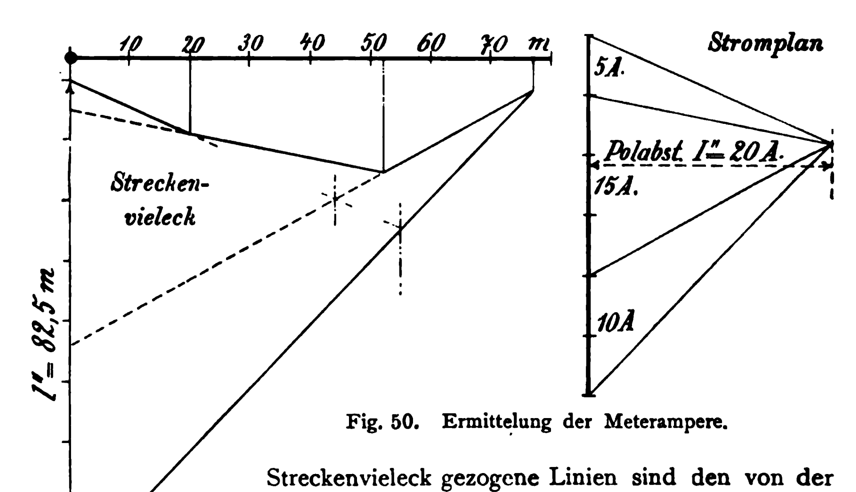


Fig. 50. Ermittelung der Meterampere.

Streckenvieleck gezogene Linien sind den von der betreffenden Stelle bis zum Schluß der Leitung zu übertragenden Meteramperezahlen proportional und daher ebenfalls proportional zum Spannungs-

verlust von der betreffenden Stelle bis zum Ende der Leitung. Die gerissen durchgezeichneten Linien lassen dabei den Einfluß jedes Abzweiges einzeln verfolgen. Der Kreuzungspunkt der ersten und letzten Vieleckseite liegt in der Entfernung des Angriffspunktes der resultierenden Amperezahl, dessen Kenntnis jedoch bei dieser Art der Lösung nicht erforderlich ist.

B. Das Dreileitersystem.

Ein Verteilungsschema nach dem Beispiel der Fig. 51 heißt ein Dreileitersystem. Die Stromquelle, in diesem Beispiel eine Akkumulatorenbatterie, besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Hälften. Vom Pluspol, von der Mitte und vom Minuspol der Batterie aus erstreckt sich je ein Leitungsdraht. Draht I ist plus gegen II, Draht II ist plus gegen III. Die eine Hälfte der Verbrauchsstellen liegt zwischen I und II, die anderen zwischen II und III. Draht II wird an die Erde angeschlossen und heißt der Mittel- oder Nulleiter. Drähte I und III werden isoliert verlegt und heißen die Außenleiter (I der positive, III der negative). Die Erdung des Mittelleiters, die nach den im Gebiet der Blitzableiter angegebenen Grundsätzen zu erfolgen hat, verhindert, daß die zwischen einem Außenleiter und Erde auftretende Spannung höhere Werte als die Hälfte der Gesamtspannung annimmt und bedeutet daher einen Schutz. Die Belastung wird auch unter Berücksichtigung der Zeit des Stromverbrauches möglichst gleichmäßig auf die Plus- und Minusseite verteilt. Bei gleicher Belastung auf beiden Seiten ist der Mittelleiter stromlos, und die beiden Hälften sind hintereinandergeschaltet. In jedem Fall führt der Mittelleiter die Differenz der Außenleiterströme und wird daher dünner ausgeführt, als die Außenleiter. Die Zentrale arbeitet in dem angeführten Beispiel mit 440 Volt, die Stromabnehmer bekommen durch die Erdung des Mittelleiters nicht mehr als 220 Volt. Die Zentrale nutzt die Vorteile der höheren Spannung aus (billigere Leitungen) ohne die Stromverbraucher der Gefahr der höheren Spannung auszusetzen.

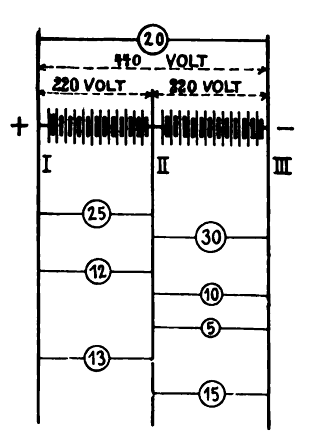


Fig. 51. Schema des Dreileitersystems.

In besonderen Fällen können Motoren zwischen die Außenleiter gelegt werden. Der Vorteil dafür besteht darin, daß für eine bestimmte Leistung dann nur die Hälfte des Stromes gegen die Schaltung zwischen einem Außen- und dem Mittelleiter gebraucht wird, daß also auch die Motoren bei Belastungsänderungen weniger empfindlich auf die Spannung der Anlage einwirken, wenn sie an den Außenleitern liegen.

Ein Nachteil des Dreileitersystemes besteht darin, daß ungleichmäßige Belastungen auf beiden Seiten für die Stromquellen (Akkumu-

latoren) unvorteilhaft sein können und künstlichen Ausgleich* beanspruchen. Bei großen Anlagen gleicht sich der Bedarf leichter aus, als bei kleinen. Auch aus dem Grunde legt man große Motoren an die Außenleiter, weil man sonst auch zwischen den Motoren Ausgleich schaffen müßte.

C. Die Ringleitung.

Liegen die Stromverbrauchsstellen angenähert in einem in sich geschlossenen Linienzuge, so führt man die Plusleitung zu ihrem Ausgangspunkt zurück, ebenso die Minusleitung, und bezeichnet dieses Gebilde als eine Ringleitung, für die Fig. 52 eine Darstellung gibt.

Wäre die Leitung auf dem Wege *ABCD* bis zur letzten Verbrauchstelle, in diesem Fall der letzten Lampe vor *A* geführt, während das letzte Schlußstück fehlte, so würde die ganze Länge der Leitung vom Strome zu durchlaufen sein. Bei der in sich geschlossenen Leitung hingegen fließt der Strom von der Eintrittsstelle aus nach zwei Seiten, und es muß in jedem Falle einen Punkt geben, wo die letzten Reste beider Stromanteile zusammentreffen. Hier ist bei der Ringleitung die entfernteste Lampe; bei gleichmäßiger Verteilung liegt sie der Eintrittsstelle gegenüber, in der Abbildung bei *C*. Zu dieser entferntesten Lampe führen zwei Stromwege, *ABC* und *ADC*, also ist der Querschnitt zu dieser Stelle hin der doppelte des Leitungsdrahtquerschnittes, während der Stromweg etwa die Häfte desjenigen Weges beträgt, der im Falle der ungeschlossenen Leitung bis zur letzten Lampe zu rechnen war. Die Summe der Meterampere wird bei dem geschlossenen Leitungszuge, der Ringleitung, vermindert, und daraus folgt:

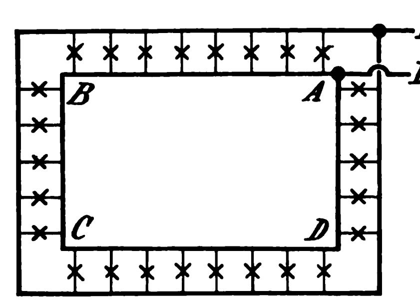


Fig. 52. Ringleitung.

Der Vorteil der Ringleitung liegt gegen die offene Anordnung in den geringeren Kupferkosten bei gleichem Spannungsverlust.

Zweigen von einer überall gleich starken Ringleitung von der ganzen Länge l die Ströme i_1, i_2 usw. ab, wozu in demselben Umlaufssinn gemessen die Strecken l_1, l_2 usw. gehören (vgl. Fig. 53), so sind diesen Strecken parallel geschaltet die Strecken $l - l_1$ bzw. $l - l_2$; daher werden die an jeden Abzweig von links und rechts her kommenden Ströme den Abständen von der Zuführungsstelle aus umgekehrt proportional sein. Hier ist wieder die Ähnlichkeit mit der Biegungslehre vorhanden. Die Ringleitung entspricht einem Träger auf zwei Stützen; die für den einzelnen Abzweig nach rechts und links entfallenden Ströme entsprechen den Auflagerdrücken, die von den einzelnen Kräften herrühren. Es können daher wiederum die Untersuchungs-

* S. Kapitel der Zentralenschaltungen § 113.

methoden der Momentenlehre auf die Leitungen übertragen werden. Es treten wieder an Stelle der Hebelarme die Leitungsstrecken und an Stelle der Kräfte die Ströme.

Für die zahlenmäßige Berechnung einer Ringleitung ist folgende Methode anzuwenden: Man bestimme zunächst von der Stromzuführungsstelle aus die Summe der Meteramperezahlen rundum im Uhrzeigersinn ($= z_0'$) und dann gegen den Uhrzeigersinn ($= z_0''$); von der Zuführungsstelle aus fließt im Sinn des Uhrzeigers der Strom $i' = z_0'' : l$ und gegen den Uhrzeiger $i'' = z_0' : l$. Der entfernteste Abzweig (entsprechend dem größten Biegungsmoment) liegt da, wo die algebraische Summe der zu- und abfließenden Ströme von rechts oder links her gerechnet durch Null geht. An dieser Stelle treffen sich die letzten Teile der von der Zuführung aus nach links und rechts gehenden Ströme. Bis zu dieser Stelle sind die von rechts und links gerechneten Meteramperezahlen gleich. An dieser Stelle tritt der größte Spannungsverlust (von beiden Seiten her gerechnet gleich) der Ringleitung auf. Der Spannungsverlust bis zu dieser Stelle, der nach Absatz A dieses Paragraphen von links oder rechts zu rechnen ist, ist bestimmend für den Querschnitt der Ringleitung.

Beispiel. Es ist ein System (Doppelleitung) nach Fig. 53 gegeben:

Die an die Ringleitung geschriebenen Zahlen bedeuten m von Abzweig zu Abzweig. Von der Zuleitung aus soll bis zum entferntesten Abzweig der Spannungsverlust 1 Volt betragen.

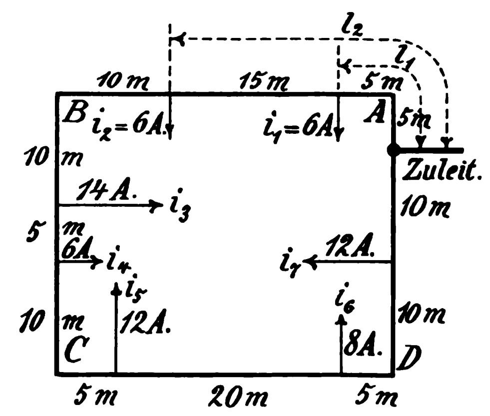


Fig. 53. Plan einer Ringleitung mit 7 Abzweigen.

a) Wieviel Strom fließt von der Zuleitung aus im Sinn des Uhrzeigers, und wieviel umgekehrt?

b) Welches ist der entfernteste Abzweig?

c) Wie stark muß die kupferne Doppelleitung sein?

Zu a) Die im Sinn des Uhrzeigers gerechnete halbe Meteramperezahl beträgt:

$$z_0' = 10 \cdot 12 + 25 \cdot 8 + 45 \cdot 12 + 60 \cdot 6 + 65 \cdot 14 + 85 \cdot 6 + 100 \cdot 6$$
$$= 3240 \text{ Meterampere.}$$

Die gegen den Uhrzeigersinn von der Zuleitung aus fließende Stromstärke ist:

$$i'' = \frac{z_0'}{l} = \frac{3240}{110} = 29{,}45 \text{ Ampere.}$$

Die gegen den Sinn des Uhrzeigers gerechnete halbe Meteramperezahl beträgt:

$$z_0'' = 10 \cdot 6 + 25 \cdot 6 + 45 \cdot 14 + 50 \cdot 6 + 65 \cdot 12 + 85 \cdot 8 + 100 \cdot 12$$
$$= 3800 \text{ Meterampere.}$$

Die im Uhrzeigersinn von der Zuleitung aus fließende Stromstärke ist:

$$i' = \frac{z_0''}{l} = \frac{3800}{110} = 34{,}55 \text{ Ampere.}$$

Zu b) Der entfernteste Abzweig liegt bei i_4, denn hier geht die algebraische Summe der Ströme von beiden Seiten durch Null:

1) $34{,}55 - 12 - 8 - 12 = +\,2{,}55$ (also positiv),
$34{,}55 - 12 - 8 - 12 - 6 = -\,3{,}45$ (also negativ);

2) $29{,}45 - 6 - 6 - 14 = +\,3{,}45$ (also positiv),
$29{,}45 - 6 - 6 - 14 - 6 = -\,2{,}55$ (also negativ).

Zu c) Die halbe Meteramperezahl links und rechts bis zu i_4 ist:

$$z = \begin{cases} = z' = 10 \cdot 12 + 25 \cdot 8 + 45 \cdot 12 + 60 \cdot 2{,}55 = \\ = z'' = 10 \cdot \;\, 6 + 25 \cdot 6 + 45 \cdot 14 + 50 \cdot 3{,}45 = \end{cases} 1013 \text{ Meterampere.}$$

Der Querschnitt der überall gleich starken Doppelleitung ergibt sich daher zu:

$$q = \frac{2 \cdot z \cdot c}{e_v} = \frac{2 \cdot 1013}{1 \cdot 57} = 35{,}55 \text{ qmm.}$$

Die zeichnerische Behandlung dieser Aufgabe geschieht mittels Stromplanes und Streckenvielecks nach Fig. 54:

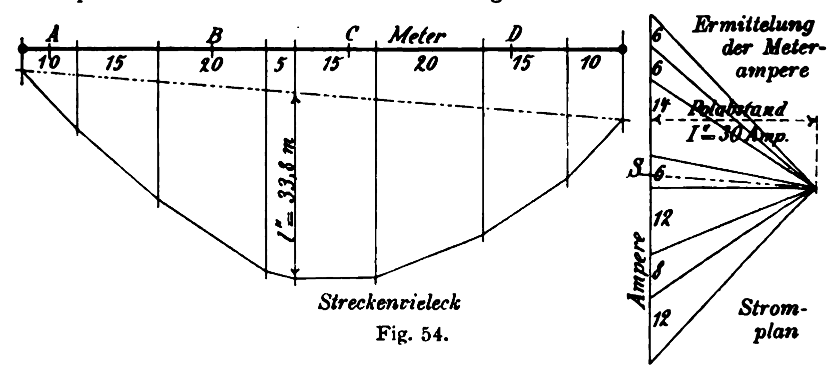


Fig. 54.

Daraus ergibt sich:

a) Eine von dem Pol des Stromplanes aus zur Schlußlinie Parallele trifft bei S unter $i'' = 29{,}5$ Ampere den Strommaßstab; i'' ist (entsprechend dem linken Auflagerdruck) der zu i_1 hingehende Strom

entgegengesetzt der Uhrzeigerdrehung. Im Uhrzeigersinn fließt zu i_7 hin der Strom $i' = 64 - 29{,}5 = 34{,}5$ Ampere.

b) Der entfernteste Abzweig ist i_4, denn hier ist der senkrecht gemessene Abstand (der proportional zum Spannungsverlust ist) zwischen Vieleck und Schlußlinie am größten.

c) Die Meterampere erhält man durch Multiplikation des gewählten Polabstandes ($I'' = 30$ Ampere) mit der abgegriffenen größten Pfeilhöhe ($l'' = 33{,}8$ m) zu:

$$l' \cdot I'' = 33{,}8 \cdot 30 = 1014 \text{ Meterampere.}$$

Der Querschnitt der überall gleich starken Doppelleitung ergibt sich sich daher:

$$q = \frac{2 \cdot l' \cdot I'' \cdot c}{e_v} = \frac{2 \cdot 1014}{1 \cdot 57} = 35{,}6 \text{ qmm.}$$

Das Ergebnis der rechnerischen Verfolgung ist genauer als dasjenige der zeichnerischen. Im vorliegenden Falle würde der Querschnitt zu 35 qmm (entsprechend den normalen Abstufungen vgl. § 40, C) zu wählen sein.

Dieses Beispiel zeigt im Vergleich mit der Biegungslehre den Vorteil der Ringleitung gegen die nicht geschlossene Leitung. Der Querschnitt der letzteren müßte in dem Maße größer werden gegen den gerechneten, wie das Biegungsmoment des einseitig eingespannten Trägers bei der entsprechenden Kräfteverteilung größer sein würde gegen das Moment des Trägers auf zwei Stützen.

D. Das einfache Leitungsnetz.

Sind kleinere Stadtteile mit Elektrizität zu versorgen, so wendet man ein Verteilungsschema nach dem Beispiel der Fig. 55 an, die einen Teil aus dem Gebiet herausschneidet. Gewöhnlich ziehen sich die Leitungen entlang der Straßenzüge. In jeder Straße liegt ein positiver und und ein negativer Draht. Von beiden Drähten zweigt man zu jeder Verbrauchsstelle ab. An den Straßenkreuzungen sind die positiven Drähte miteinander und ebenso die ne-

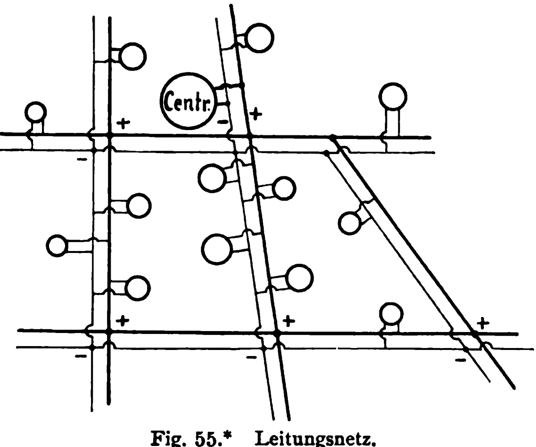


Fig. 55.* Leitungsnetz.

* Die Leitungsdrähte sind nur zur Unterscheidung verschieden stark gezeichnet.

gativen miteinander verbunden. Das Ganze heißt ein Leitungsnetz. Es besteht aus einer Zusammenstellung von Ringleitungen, wobei immer eine Doppelleitung für zwei zusammenstoßende Häuserviertel gemeinsam ist. Die Stromquelle arbeitet direkt auf das Netz, wobei von der Stromquelle bis zur entferntesten Lampe der Spannungsverlust die in § 38 B b erwähnten 2 % beträgt.

Mit der üblichen Forderung, daß 4 kg Leitungskupfer für eine gleichzeitig mit anderen brennende Lampe nicht überschritten werden, kommt man mit dem hier beschriebenen Leitungsnetz in Ortschaften mittleren Strombedarfs bei 100 bis 120 Volt meistens nicht über 300 m im Umkreis um die Zentrale hinaus. Bei Anwendung der doppelten Spannung (200 bis 240 Volt) wird der Radius des Gebietes etwa 600 m und bei Anwendung eines Dreileitersystemes von 2 × 200 bis 2 × 240 Volt kommt man bis auf etwa 1200 m Entfernung.

E. Das Leitungsnetz mit Speisepunkten.

Das beherrschte Gebiet kann gegen die Angaben in Absatz D etwa auf den doppelten Radius gebracht werden durch Anwendung von Speiseleitungen, die etwa 10 % Spannungsverlust aufweisen. Die Zentrale erzeugt eine um etwa 10 % höhere Spannung, als das Netz braucht. Von der Zentrale aus führen eine Anzahl von Doppelleitungen

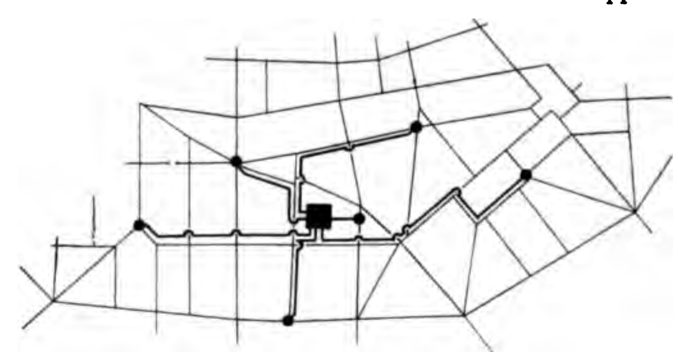


Fig. 56. Leitungsnetz mit Speisepunkten.

zu mehreren zweckmäßig ausgesuchten Punkten des Netzes, wo sie (meistens an Straßenkreuzungen) mit dem Netz verbunden werden. Eine solche Verbindungsstelle heißt ein Speisepunkt. Jeder Speisepunkt liefert für sein Bereich den Strom, wobei aber die einzelnen Bereiche durch die Netzleitungen miteinander verbunden sind. Das Schema der Schaltung ist durch Fig. 56 für ein Beispiel ausgedrückt. Die dünnen Linien bedeuten die Doppelleitungen des Netzes, die dicken Linien diejenigen der Speiseleitungen.

Die Zentrale mißt durch Vermittelung einer dünnen, vom Speisepunkt zur Zentrale zurückgeführten Prüfleitung die Spannung jedes Speisepunktes und regelt sie (z. B. durch Vergrößerung oder Verkleinerung eines in die Speiseleitung eingeschalteten Widerstandes) nach Be-

darf auf den zulässigen Höchstwert der Netzspannung. Das Netz ist so bemessen, daß die von ihrem Speisepunkt aus entfernteste Lampe 2 % Spannungsverlust erleidet. Es nutzt also dieses Verteilungssystem auch für Beleuchtungszwecke die Vorteile des wirtschaftlichen Spannungsverlustes aus und ermöglicht außerdem einen guten Ausgleich, falls vorübergehend an einzelnen Stellen außergewöhnliche Belastungen auftreten. Es verschieben sich dann bei guter Regelung der Speisepunkte die Grenzen ihrer Gebiete je nach Bedarf.

Mit diesem Verteilungssystem kommen bei 2 × 220 Volt Dreileiterspannung schon recht große Städte aus.

F. Verteilungssysteme bei Hochspannung.

Für Verteilungssysteme mit Wechselstrom-Hochspannung kommt ein Schema ebenfalls nach Fig. 56 in Betracht, nur mit dem Unterschied, daß die Speiseleitungen Hochspannung führen und am Speisepunkt einen Transformator brauchen, dessen Hochspannungsklemmen (primär) mit dem Endpunkt der Speiseleitung, dessen Niederspannungsklemmen (sekundär) hingegen mit dem Netz verbunden sind. Bei sehr weiten Gebieten unterteilt man das Sekundärnetz, vor allem, wenn es sich um wirtschaftlich getrennte Gebiete (z. B. mehrere Ortschaften) handelt.

Bei Hochspannungsanlagen ist es nicht mehr nötig mit 10 % Spannungsverlust zu arbeiten, denn die Hochspannung ermöglicht 2 % Spannungsverlust in Speiseleitung, Transformator und Netz zusammen, ohne daß für die weitesten vorkommenden Gebiete 4 kg Kupfer auf eine gleichzeitig mit anderen brennende Lampe überschritten werden. Auch wäre eine Regelung so vieler Speisepunkte, als bei ausgedehnten Anlagen in Frage kommen, kaum durchführbar.

In vielen Fällen wendet man neben dem Niederspannungsnetz auch ein Hochspannungsnetz an, welches dadurch entsteht, daß das in Fig. 56 stark gezeichnete Leitungssystem ebenfalls geschlossene Ringleitungen erhält.

Der gewöhnliche, bisher behandelte Wechselstrom leidet an dem Nachteil, daß er für Motorenbetriebe unzweckmäßig ist, während er für Beleuchtungsanlagen ohne Umstände verwendet werden kann. Wo viel Motoren anzuschließen sind, benutzt man drei zeitlich zueinander verschobene Wechselströme, die durch drei Leitungen übertragen werden können, ebenfalls transformierbar sind und sich zur Licht- und Kraftabgabe gleich gut eignen. Man nennt ein solches System (vgl. § 120) ein Drehstrom- oder Dreiphasensystem, während der gewöhnliche Wechselstrom als einphasiger Wechselstrom bezeichnet wird.

Die größten ausgeführten Hochspannungsleitungen befinden sich in Nordamerika bis zu 350 km Streckenlänge.

§ 40. Die Ausführungsformen der Leitungen.

A. Freileitungen.

Im Freien durch die Luft gespannte Leitungen, die Freileitungen, werden aus reinem, hart gezogenem Kupfer, Kupfer mit Zusätzen zur

Erhöhung der Festigkeit und aus Bronzen (Siliziumbronze) hergestellt und meistens blank, d. h. ohne isolierende Umhüllung verwendet. Man verlegt sie auf aufrecht stehenden Isolierglocken (vgl. Fig. 57) aus Porzellan, die auf den Traversen der Gestänge oder auf Häuserkonsolen mittels eiserner Stützen befestigt werden. Wo Freileitungen vorkommen, sind sie meistens die Verteilungsleitungen, die von der Zentrale aus entlang der Straßenzüge gelegt werden. Sie führen entweder die Gebrauchsspannung, die Niederspannung, und werden dann nicht tiefer als 5 m von der Erdoberfläche entfernt montiert. Ihr geringster zulässiger Querschnitt ist 6 qmm. Hochspannungsfreileitungen dürfen nicht weniger als 10 qmm Querschnitt haben, werden auf besonderen Hochspannungs-Isolierglocken (vgl. Fig. 58) angebracht und sind an Fahrstraßen durch Fangnetze gegen Herabfallen zu sichern. Hochspannungs-Freileitungen müssen in ihren tiefsten Punkten mindestens 6 m, bei Wegübergängen mindestens 7 m von der Erde entfernt sein.

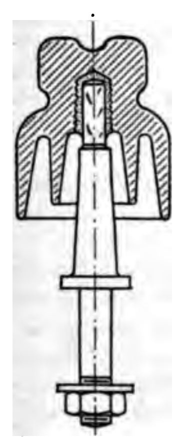


Fig. 57. Isolierglocke auf gerader Stütze.

Der Leitungsdraht wird mit kupfernem, verzinntem Bindedraht am Kopf der Isolierglocke befestigt. Für das Gestänge kommen hölzerne getränkte* oder eiserne Maste zur Verwendung. Letztere werden als Gittermaste (Flachmaste, Fig. 59, und aus Winkeleisen zusammengesetzte Quadratmaste), Rundmaste (Mannesmann- und spiralgeschweißte Maste, vgl. Figg. 60 und 61) und schließlich als Rippenrohrmaste (vgl. Fig. 62) ausgeführt. Die Traversen, aus Eichenholz oder aus Eisen hergestellt, sind normal 8 cm hoch und werden je nach Art des Mastes mit Schellen oder mit Kopfbolzen und Mutter befestigt. Stärke und Zahl der Maste in gerader Strecke bestimmt man nach dem Winddruck, der auf die Leitungen entfällt, und der die Stangen auf Biegung beansprucht (man rechnet mit 125 kg auf 1 qm). Übliche Mastabstände sind 30 bis 40 m. Holzmaste sind in der Anschaffung billiger, halten aber im Mittel nicht länger, als etwa 6 Jahre. Im allgemeinen stellen sich Eisenmaste im Gebrauch günstiger. Bei Holzgestänge ist es vorteilhaft, wenigstens an den Knickpunkten Eisenmaste zu verwenden, da ein Mast an einem Knickpunkt schwer auszuwechseln ist. Bei Masten an Knickpunkten kommt neben dem Winddruck der Zug der Leitungen in Frage, der in Richtung der Resultierenden aus den

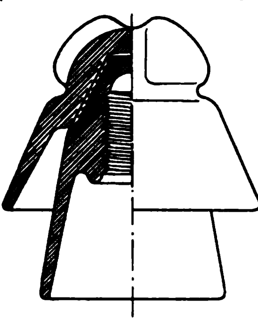


Fig. 58. Hochspannungsglocke (Porzellanfabrik Hermsdorf).

*) Karbolineum, Kupfervitriol, Sublimat, Zinkchlorid.

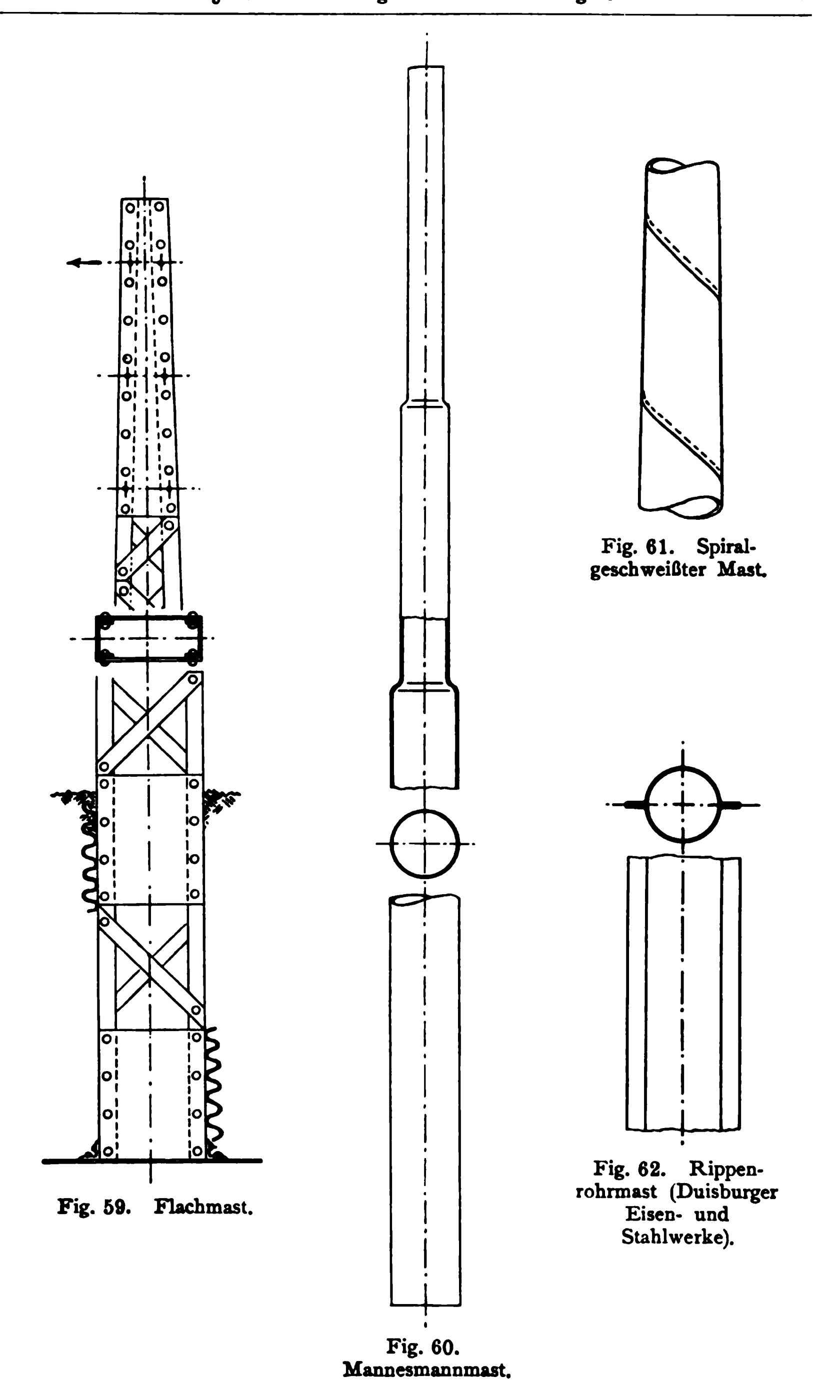


Fig. 59. Flachmast.

Fig. 60. Mannesmannmast.

Fig. 61. Spiralgeschweißter Mast.

Fig. 62. Rippenrohrmast (Duisburger Eisen- und Stahlwerke).

Spannkräften des Drahtes den Mast auf Biegung beansprucht. Wo es angängig ist, werden die Maste an Knickpunkten verstrebt oder verankert. Ebenfalls verankert man die Maste an den Endpunkten einer Freileitung, woselbst auch der Leitungsdraht an 2 Isolierglocken befestigt wird, indem man das Ende der Leitung in Form einer fest verdrillten Schleife um den Hals der äußersten Glocke legt.

Die Drähte werden beim Spannen durch Klemmvorrichtungen gepackt und durch Flaschenzug angezogen. Den Durchhang der Drähte bemißt man bei der Verlegung so, daß der Zug in der Leitung bei kältestem Wetter und gleichzeitigem Winddruck den zulässigen Wert nicht überschreitet. Die in den Handel kommenden Hartkupfersorten (Straßenbahndraht usw.) können bis 1300 kg/qcm mit mehr als vierfacher Sicherheit beansprucht werden. Für dieses Material ergeben sich bei Verwendung blanker Drähte* folgende Zahlen, wobei die Durchhänge für Windstille und 40 m Spannweite gelten:

für 50 qmm:

Temperatur (° Cels.)	Durchhang (cm)	Beanspruchung (kg/qcm)	Zug im Draht (kg)
— 20	16	1136	568
— 10	18,5	970	485
0	22	822	411
10	26,5	686	343
20	32	562	281
30	39	454	227

für 25 qmm:

Temperatur (° Cels.)	Durchhang (cm)	Beanspruchung (kg/qcm)	Zug im Draht (kg)
— 20	18,7	970	242,5
— 10	22,2	810	202,5
0	26,7	670	167,5
10	32,3	550	137,5
20	39,1	450	112,5
30	47,1	370	92,5

für 10 qmm:

Temperatur (° Cels.)	Durchhang (cm)	Beanspruchung (kg/qcm)	Zug im Draht (kg)
— 20	32,8	555	55,5
— 10	39,6	460	46,0
0	46,4	390	39,0
10	53,4	337	33,7
20	60,8	300	30,0
30	68,6	265	26,5

* Nach K. Otto, Elektrotechnische Zeitschrift. 1903, S. 38.

Die Anwendung von Federwagen (Dynamometern) zur Bestimmung des Zuges im Draht unter Benutzung dieser oder ähnlicher Tabellen ist das übliche Verfahren.

Kommt bei — 20° gleichzeitig ein seitlicher Winddruck von 125 kg/qm hinzu, so wird in den drei Fällen die Beanspruchung von 1300 kg/qcm erreicht, wobei ohne Eiskruste gerechnet ist.

Wegen der hohen vorkommenden Zugkräfte müssen Drahtverbindungen so ausgeführt werden, daß die Verbindungsstelle die gleiche Zugfestigkeit besitzt, wie die Leitung selbst. Lötungen haben den

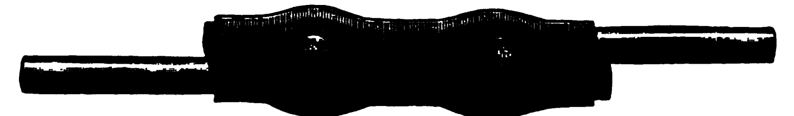


Fig. 63. Nieterverbinder (J. W. Hofmann, Kötzschenbroda).

Nachteil, daß das Leitungsmaterial dadurch weich wird. Diesen Übelstand vermeiden die Nietverbinder (vgl. Fig. 63).

Wichtige Apparate an Freileitungen sind Ausschalter, Sicherungen und Blitzschutzvorrichtungen (vgl. §§ 41 bis 43).

Vorzüge der Freileitungen gegen Kabel sind: geringere Anschaffungskosten, Sichtbarkeit der Leitungen und leichte Ausbesserungsmöglichkeit; Nachteile der Freileitungen gegen Kabel sind: Verunzierung des Straßenbildes, leichte Gefährdung der Leitungen durch zufällige Beschädigung und Elementargewalt, näher liegende Gefährdung der Öffentlichkeit durch Leitungsbrüche.

B. Kabelleitungen.

In ganzer Länge mit gutem Isoliermaterial umgebene und gegen Zutritt von Feuchtigkeit geschützte, ohne weitere Isolation verlegbare Leitungen heißen Kabelleitungen. Sie werden aus reinem verseiltem Kupfer hergestellt, gewöhnlich mit von Harzöl durchtränktem Papier oder Fasermaterial, seltener mit Gummi, bei Unterseekabeln mit Guttapercha, isoliert und durch einfachen oder doppelten Bleimantel (Benutzung des teigartigen Zustandes des Bleies zwischen dem festen und flüssigen) gegen Feuchtigkeitszutritt gesichert (blanke Kabel). Gegen mechanische Beschädigung schützt man die Kabel durch Umhüllung mit Fasermaterial und Tränkung mit Asphaltgemischen (asphaltierte Kabel), weiterhin durch eine Bewehrung (Armierung, Bepanzerung) mit Stahl- oder Eisenband bzw. -Drähten (eisenarmierte Kabel). Kabel kommen hauptsächlich für die Verteilungsleitungen in den Straßen zur Verwendung und werden in diesem Falle mit einem äußeren Schutz versehen (Kabelsteine als Warnungszeichen bei Erdarbeiten) in die Erde gelegt. Sie können entweder die Gebrauchsspannung (Niederspannung) führen oder auch (Hochspannungskabel) als Speiseleitungen von einer Wechselstromzentrale aus zu den Transformatoren dienen. Bei eisenarmierten Kabeln für Wechselstrom müssen sämtliche zu einem Strom-

kreis gehörige Leitungen in demselben Kabel enthalten sein. Man unterscheidet einadrige (vgl. Fig. 64) und mehradrige Kabel. Letztere werden als verseilte (vgl. Fig. 65) oder als konzentrische (vgl. Fig. 66)

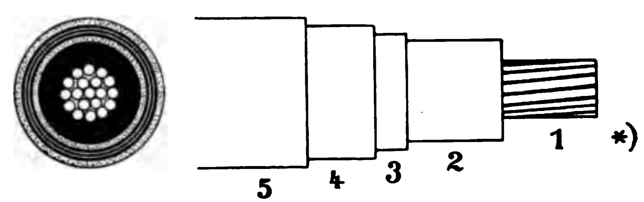


Fig. 64. Einadriges asphaltiertes Kabel.

Kabel ausgeführt. Konzentrische Kabel haben Nachteile gegen die verseilten und werden daher nicht mehr zu neuen Anlagen verwendet. Vierfach verseilte Kabel, bei denen je zwei nebeneinanderliegende Adern parallel geschaltet sind, lassen bei etwa eintretenden Isolationsfehlern den Ausweg zu, durch Wechseln der parallelgeschalteten Adern die Isolation zu verbessern. Bei der Verlegung der Kabel ist ein bestimmter, von den Kabelwerken vorgeschriebener Krümmungsradius nicht zu unterschreiten. Zur Verbindung von Kabeln verwendet man Ausrüstungsteile (Kabelarmaturen, -garniturteile), die mindestens ebenso gut und sicher isolieren, wie das Kabel selbst. Sie bestehen aus zweischaligen, gußeisernen Kästen, die mit Hälsen versehen sind, an denen die Kabel mit Hilfe von Schellen fest (mechanisch haltbar, aber ohne übermäßige Formänderung im Kabelinnern) angefaßt werden. Die verschiedenen Kabelmäntel sind im Innern der Kästen stufenweise entfernt, bis im

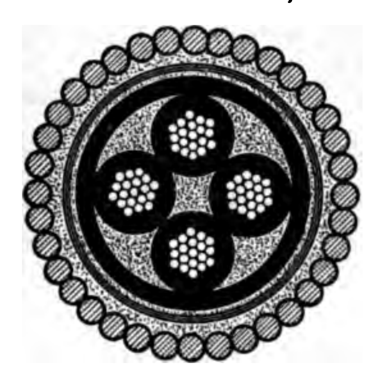


Fig. 65. Querschnitt eines vierfach verseilten eisendrahtarmierten Kabels.

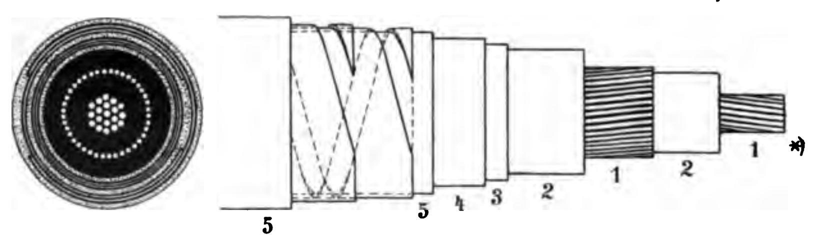


Fig. 66. Konzentrisches eisenbandarmiertes Kabel.

* 1 = Kabelseele, 2 = Isoliermaterial, 3 = getränktes Fasermaterial, 4 = doppelter Bleimantel, 5 = asphaltierter Hanf.

letzten Stück die Kupferadern für die Verbindung bloßgelegt sind. Die übliche Verbindung der Adern erfolgt durch Verschraubung mit Hilfe von Klemmen. Lötungen sind nur mit bestimmten Mitteln vorteilhaft (übergeschobene Hülsen mit Längsschnitt zur



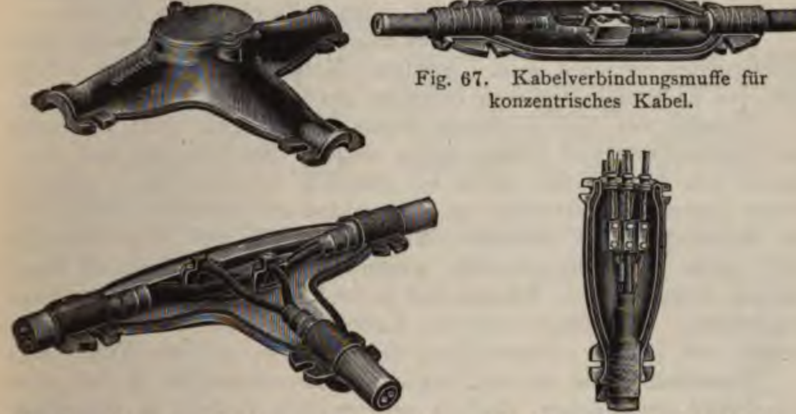


Fig. 67. Kabelverbindungsmuffe für konzentrisches Kabel.

Fig. 68. Abzweigmuffe für verseiltes Kabel. Fig. 69. Kabel-Endverschluß.

Einführung des Weichlotes durch den Kolben, Vermeidung der Wärmeableitung zum Kabel hin). Nachdem der Deckel des Kastens

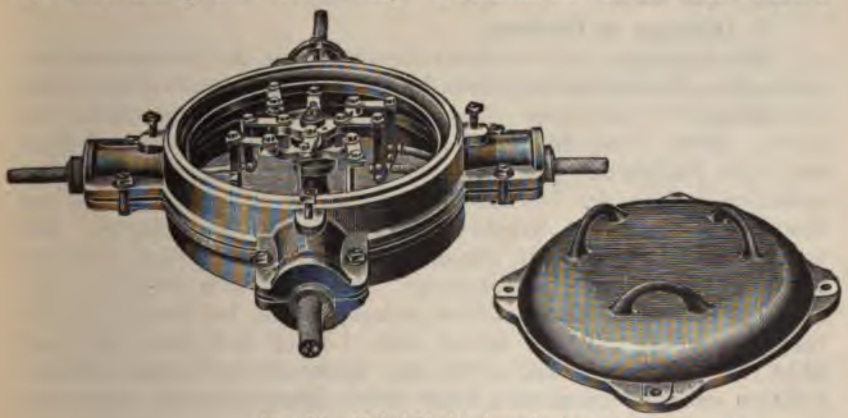


Fig. 70. Kabel-Verbindungskasten.

aufgebracht ist, wird die ganze Höhlung mit Kabelfüllmasse (Chattertonmasse oder anderen Asphaltgemischen) vergossen. Die Eingießöffnungen werden nach Erkaltung der Masse (Nachgießen beim Erstarren) durch Bolzen verschlossen. Man unterscheidet an Kabelausrüstungsteilen die

Verbindungsmuffen (vgl. Fig. 67), die Abzweigmuffen (vgl. Fig. 68), die Kabelendverschlüsse (vgl. Fig. 69), sowie Kabelsicherungs- und Schaltkästen (vgl. Fig. 70). Die Kabelverbindungskästen werden so weit vergossen, daß die Verbindungsstreifen über der Füllmasse zu liegen kommen. Der Deckel wird mit Gummieinlage luft- und wasserdicht aufgeschraubt. Der Kasten wird so eingebaut, daß er ohne Erdarbeiten zugängig ist. Man ermöglicht dadurch leichte Abtrennung von Kabelstrecken in besonderen Fällen, z. B. beim Aufsuchen von Fehlern.

Auch außerhalb des Erdreiches müssen Kabel mit denselben Ausrüstungsteilen versehen sein. Armierte Kabel bedürfen auch außerhalb der Erde eines weiteren Schutzes nicht.

Vorzüge der Kabelleitungen gegen Freileitungen sind: Erhaltung des Straßenbildes und Schutz gegen zufällige Beschädigung, mit Ausnahme von Erdarbeiten, sowie bei gänzlich unterirdischer Verlegung Schutz gegen die Elektrizität der Atmosphäre und geringere Gefährdung der Öffentlichkeit bei Betriebsunfällen. Nachteile der Kabelleitungen sind: große Anschaffungskosten, wegen der Unsichtbarkeit oft langwieriges Aufsuchen von Fehlern und dadurch erschwerte Ausbesserungsmöglichkeit. Schließlich wird eine Kabelleitung eine kürzer begrenzte Anzahl von Jahren gebrauchsfähig sein können, als eine Freileitung.

Kabelsteine, die ein nachträgliches Auswechseln der Kabel ohne Erdarbeiten ermöglichen, sind in neuerer Zeit vielfach in Aufnahme gekommen. Durch die Öffnung des fertig verlegten Kabelsteines wird beim Einziehen von Teilpunkt zu Teilpunkt zunächst ein Stahldrahtseil durchgeschoben, woran das Kabel befestigt und mit Windwerken durchgezogen wird.

C. Leitungen in Gebäuden.

Die Leitungen in Gebäuden haben mehr als die bisher genannten durch die „Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen"* besondere Vorschriften und Ausführungsregeln erhalten. Diese Vorschriften finden allgemeine öffentliche Anerkennung und ihre Einhaltung wird auch für private Anlagen gefordert. Sie enthalten je nach der Beschaffenheit der elektrischen Anlage und der Räume eine Reihe von Regeln bestimmter Anwendungsbereiche. Die wichtigste Grenze zwischen diesen Bereichen ist diejenige zwischen Niederspannung und Hochspannung. Sie ist dadurch festgelegt, daß als Niederspannungsanlagen solche Anlagen gelten, bei denen die Gebrauchsspannung zwischen irgend einer Leitung und Erde 250 Volt nicht überschreiten kann. Für die stromverbrauchenden Anlagen kommen daher in den meisten Fällen die für Niederspannung gegebenen Vorschriften in Betracht, auch bei Dreileiteranlagen bis zu 2 × 250 Volt mit geerdetem Mittelleiter. Die im folgenden angeführten Vorschriften

* Herausgegeben vom Verband deutscher Elektrotechniker (Berlin, Julius Springer). Diese, wie auch andere Verbandsveröffentlichungen sind im Buchhandel einzeln erhältlich.

und Regeln sind im wesentlichen aus den für Niederspannung gegebenen Sicherheitsvorschriften und anderen Normen des Verbandes herausgegriffen, machen hingegen keinen Anspruch auf Wörtlichkeit und Vollständigkeit.

Als Kupfer für Leitungen in Gebäuden darf nur solches verwendet werden, dessen spezifischer Widerstand bei 15 Grad $c = 0{,}0175$ oder weniger beträgt.

Für Leitungen in Gebäuden werden folgende Drahtquerschnitte (q) hergestellt, die bei isolierten Drähten und oberirdischen Kabeln mit der unter I angegebenen normalen Stromstärke (Nennwert der Stromstärke) belastet werden sollen, und nach der (vgl. § 42) die Sicherungen zu bemessen sind. Die höchstzulässige Stromstärke ist in der Zusammenstellung mit I' bezeichnet und in dritter Kolonne in Klammern angegeben.

q qmm	I Amp.	(I' Amp.)	q qmm	I Amp.	(I' Amp.)
1	6	(11)	95	190	(240)
1,5	10	(14)	120	225	(280)
2,5	15	(20)	150	260	(325)
4	20	(25)	185	300	(380)
6	25	(31)	240	360	(450)
10	35	(43)	310	430	(540)
16	60	(75)	400	500	(640)
25	80	(100)	500	600	(760)
35	100	(125)	625	700	(880)
50	125	(160)	800	850	(1050)
70	160	(200)	1000	1000	(1250)

Blanke Kupferleitungen bis zu 50 qmm unterliegen gleichfalls den Vorschriften dieser Tabelle. Auf Freileitungen finden die vorstehenden Zahlenbestimmungen keine Anwendung.

Aus diesen Werten ist zu ersehen:

Bei geringstem Querschnitt wird zugelassen auf 1 qmm 6 Amp.
„ 4 qmm „ „ „ „ 1 „ 5 „
„ 10 „ „ „ „ 1 „ 3,5 „
„ 50 „ „ „ „ 1 „ 2,5 „
„ 95 „ „ „ „ 1 „ 2 „
„ 1000 „ „ „ „ 1 „ 1 „

Maßgebend ist für obige Zahlen die Erwärmung, die der Draht durch den Strom erleidet, und die in geringen Grenzen gehalten werden soll. Man kann deshalb nicht für alle Querschnitte dieselbe Strombelastung auf 1 qmm zulassen, weil die abkühlende Oberfläche bei Vergrößerung des Querschnittes langsamer zunimmt, als die Querschnittsfläche. Als Anhaltspunkte mögen einige der von Kennelly beobachteten Werte dienen, die für blanke Kupferdrähte gegenüber der umgebenden Luft gelten:

D = Durchmesser des Drahtes in mm,
Q = Querschnitt des Drahtes in qmm,
τ' = Temperaturerhöhung des Drahtes bei Stromdurchgang.

D	Q	$\tau' = 5°$	$\tau' = 10°$	$\tau' = 20°$	$\tau' = 40°$	$\tau' = 80°$
2	3,14	12 Amp.	18 Amp.	25 Amp.	35 Amp.	47 Amp.
4	12,6	28 „	40 „	56 „	77 „	105 „
8	50,3	64 „	90 „	126 „	179 „	247 „
16	201	156 „	220 „	310 „	415 „	610 „
24	452	268 „	372 „	524 „	746 „	1050 „

Als Normen für die Durchmesser einheitlicher Anschlußschrauben aus Eisen gelten folgende Zahlen:

Ampere . .	50	100	200	400	700	1000
englische Zoll	$^1/_4$	$^5/_{16}$	$^3/_8$	$^1/_2$	$^5/_8$	$^3/_4$
mm . . .	6	8	10	13	16	20

a) Als Leitungen in Gebäuden kommen in Frage:

1. Blanke Leitungen. Sie werden auf Isolierglocken in vorgeschriebenen Abständen voneinander und von der Wand (5 cm von der Wand und bei geringsten Spannweiten nicht weniger als 10 cm voneinander) verlegt. Isolierglocken dürfen in Gebäuden, wenn die aufrechte Stellung nicht möglich ist, eine Neigung bekommen, jedoch nur so weit, daß sich kein Wasser in ihnen ansammeln kann. Der geringste zulässige Querschnitt für blanke Leitungen in Gebäuden beträgt 4 qmm. Blanke Leitungen außerhalb elektrischer Betriebsräume sind gegen zufällige Berührung zu schützen. In bewohnten Räumen und in feuergefährlichen Betriebsstätten und Lagerräumen dürfen blanke Leitungen überhaupt nicht verwendet werden.

2. Gummibandleitungen sind mit massiven Leitern von 1 bis 16 qmm, mit mehrdrähtigen* von 1 bis 150 qmm zulässig. Die Kupferseele ist feuerverzinnt,** mit Baumwolle umgeben und mit unverfälschtem, unvulkanisiertem Paragummiband umwickelt.*** Darauf folgt eine zweite Umwicklung mit Baumwolle und schließlich eine Faserstoffhülle, die mit einem Riemengang hergestellt wird (Umklöpplung). Letztere ist mit einer geeigneten Tränkung (meistens einem Asphaltgemisch) versehen. Die Gummibandleitungen sind nur geeignet zur festen Verlegung über Putz in trocknen Räumen, und zwar auf Isolierrollen bis 250 Volt, auf Isolierklemmen (oder in Isolierrohren) bis 125 Volt.†

3. Gummiaderleitungen gibt es für Verlegungszwecke mit massiven Drähten von 1—16 qmm, mit mehrdrähtigen †† Leitern von 1—1000 qmm. Für Fassungsadern in Beleuchtungskörpern kommt auch der Quer-

* Von 1 bis 25 qmm 7 Drähte.
** Die Feuerverzinnung verhindert chemische Verbindungen des Gummis mit dem Kupfer.
*** Natürlicher unvulkanisierter Gummi ist klebrig und haftet an der Überlappung aneinander.
† Näheres über Verlegungsarten s. w. u.
†† Siehe oben Fußnote *.

schnitt von 0,75 qmm vor, der bis zu 4 Ampere angewendet werden kann. Die Kupferseele ist feuerverzinnt und mit einer wasserdichten vulkanisierten* Gummihülle umgeben. Über dem Gummi folgt eine Hülle gummierten Bandes und schließlich eine getränkte Umklöpplung aus Faserstoff. Die Gummiaderleitungen sind nur für feste Verlegung (auf Isolierrollen und -klemmen, in Isolierrohren oder in Metallrohren ohne isolierende Auskleidung) geeignet und können (mit 5 cm Abstand gegeneinander und von der Wand auch für feuchte Räume) bis 1000 Volt, in Rohren auch unter Putz, verwendet werden.

4. Gummiaderschnüre. Die Kupferseele besteht aus feuerverzinnten Drähten von höchstens 0,3 mm Durchmesser. Sie ist mit Baumwolle umwickelt und weiterhin mit einer wasserdichten vulkanisierten Gummihülle umgeben. Jede Einzelleitung ist mit einer Umklöpplung aus Seide oder Glanzgarn versehen. Die umklöppelten Adern werden gewöhnlich als Doppelleitung (oder zu 3 Adern) umeinander verdrillt und heißen dann Mehrfachschnüre. Gummiaderschnüre gibt es von 1 bis 6 qmm für Verlegungszwecke und als Fassungsader bis 4 Ampere auch mit 0,75 qmm. Sie sind verwendbar, auch verdrillt, als fest verlegte Leitung in trocknen Räumen bis 1000 Volt und zum Anschluß beweglicher Stromverbraucher bis 500 Volt.

5. Panzeraderleitungen und Panzeraderschnüre bestehen aus einer verdrillten Mehrfachschnur oder -leitung mit gemeinsamer Hülle und darüber einer dichten Metallumklöpplung. Sie können als Leitung ohne weitere Isolation nur nicht in Erde fest verlegt werden. Sie finden als Schnur außerdem Verwendung mit geerdetem Metallmantel zum Anschluß beweglicher Stromverbraucher in Schaufenstern und Warenhäusern.

6. Pendelschnüre sind verdrillte, mit einer Tragschnur verseilte Gummiaderschnüre in gemeinsamer Umklöpplung mit Seide oder Glanzgarn. Sie dienen bis 250 Volt zum Anschluß frei beweglicher an der Decke hängender Lampen (Schnurzugpendel). Die Tragschnur trägt die Lampe, während oben und unten die Leitungsdrähte, die vom Zug entlastet sein sollen, in einem kleinen Bogen geführt werden.

7. Kabel dürfen in jedem Fall nur mit Verschlußteilen, wie sie unter B dieses Paragraphen gekennzeichnet sind, verwendet werden. Ohne Bewehrung sind sie gegen chemische und mechanische, mit Bewehrung nur gegen chemische Beschädigungen zu schützen. An den Befestigungsstellen darf der Bleimantel nicht eingedrückt oder verletzt werden; Rohrhaken sind daher nur bei armierten Kabeln und Panzeradern zulässig.

b) Verlegung. Für Leitungen in Gebäuden gelten Verlegungsregeln, von denen das Notwendigste im folgenden ausgewählt ist:

---

* Der natürliche unvulkanisierte Gummi wird mit Schwefelblüte versetzt, um den Draht gepreßt und mit dem letzteren auf etwa 160° erwärmt, wodurch eine chemische Verbindung des Gummis mit dem Schwefel entsteht, der vulkanisierte Gummi, der den klebrigen Zustand aufgegeben hat und elastisch ist.

Bei Verlegung auf Isolierrollen und -klemmen (vgl. Figg. 71 und 72), die gewöhnlich aus Porzellan hergestellt werden, soll auf höchstens 80 cm eine Befestigungsstelle kommen. Rollen und Klemmen müssen so geformt und angebracht sein, daß sie die Leitungen

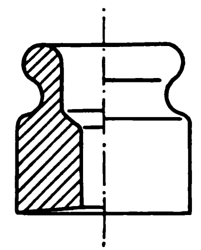


Fig. 71. Isolierrolle.

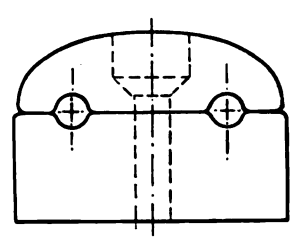


Fig. 72. Isolierklemme.

mindestens 10 mm von der Wand entfernt halten und die Leitungen nicht durch scharfe Kanten beschädigen.

Drahtverbindungen sind nur durch Verlötung und Verschraubung oder gleichwertige Mittel, jedoch nicht durch einfache Verdrehung herzustellen. Die Lötstellen sind mit gummiertem Isolierband gut zu umwickeln. Die Lötung wird mit Mitteln, deren Reste nach dem Erkalten das Metall nicht weiter angreifen, vorgenommen.

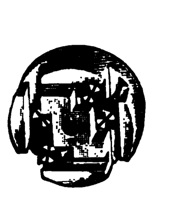


Fig. 73. Abzweigscheibe (Siemens-Schuckertwerke).

Bei verdrillten Leitungsschnüren darf Bindedraht zur Befestigung an den Isolierrollen nicht verwendet werden. Verbindungen und Abzweigungen bei verdrillten Schnüren dürfen nicht durch Lötung, sondern nur durch Verschraubung auf isolierender Grundlage (Porzellan, Glas) ausgeführt werden. Hierzu gibt es Verbindungsscheiben und Abzweigscheiben (vgl. Fig. 73). An den Enden von Leitungsschnüren müssen, wenn nicht besondere Kabelschuhe verwendet werden, die dünnen Einzelleiter an der Anschlußstelle miteinander verlötet sein.

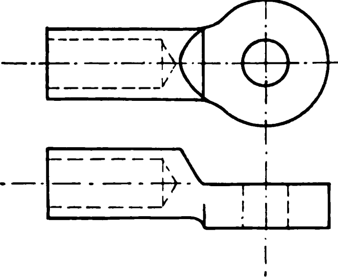


Fig. 74. Kabelschuh.

Alle Anschluß- und Abzweigstellen sowohl bei Leitungen als auch bei Schnüren müssen von Zug entlastet sein.

Einzeldrähte bis zu 25 qmm können ohne weiteres, und Schnüre oder Drahtseile bis zu 6 qmm mit verlöteten Enden durch angebogene Ösen angeschraubt werden; darüber hinaus sind stets Kabelschuhe (vgl. Fig. 74) oder gleichwertige Anschlußmittel erforderlich.

Bewegliche Leitungen dürfen nur mittels lösbarer Kontakte und mit allpoliger Sicherung im festen Teile (Anschlußdose und Steckkontakt, vgl. Fig. 75) angeschlossen werden.

Kreuzungen von Leitungen unter sich und mit sonstigen Metallteilen sind so auszuführen, daß Berührung ausgeschlossen ist. Kann



Fig. 75. Anschlußdose mit Steckkontakt.

kein genügender Abstand eingehalten werden, so sollen isolierende Rohre übergeschoben oder isolierende Platten dazwischengelegt werden. Rohre und Platten werden an den Leitungen festgebunden.

Soweit festverlegte Leitungen der mechanischen Beschädigung ausgesetzt sind, oder soweit sie im Handbereich liegen, müssen sie durch Verkleidungen geschützt werden, die so hergestellt sein sollen, daß die Luft frei durchstreichen kann. Rohre gelten als Schutzverkleidung. Armierte Bleikabel und metallumhüllte Leitungen, sowie sämtliche Leitungen in elektrischen Betriebsräumen unterliegen dieser Vorschrift nicht.

Holz ist als Isolationsmittel unter allen Umständen verboten, ebenso die Verlegung von Leitungen in Holzleisten. Holz hat die nachteilige Eigenschaft, Feuchtigkeit aufzunehmen, d. h. bei Hinzukommen der Holzsäfte stromleitend zu werden, sich durch den Strom zu erhitzen und so die Brandgefahr nahe zu bringen. Es kommt daher als einfachster und billigster Schutz für Leitungen im Handbereich nur das aus harzölgetränktem Papier mit Metallumhüllung hergestellte Bergmannrohr mit seinen Abarten in Frage. Die Folge ist, daß man offen verlegte Leitungen nur an oder dicht unter der Decke gern verwendet und jede nach unten führende Leitung in ganzer Länge mit Schutzrohr versieht.

Rohrsysteme sind solche Leitungssysteme, bei denen die Leitungen ganz in Rohren untergebracht sind. Die Rohre können ohne Leitungsdrähte verlegt werden, so lange das Gebäude im Rohbau steht; sie werden dann überputzt und nach Austrocknung der Wände von geeignet angebrachten Verbindungsdosen aus, deren Deckel über den Putz herausragt, nachträglich mit den Leitungen versehen. Rohrsysteme haben daher den Vorteil, daß die Drähte gut und sicher liegen, und daß sie unter Putz verlegt die Innenarchitektur nicht stören, sie mahnen aber zu guter Beaufsichtigung der Montage in bezug auf Querschnitt und Isolation des verwendeten Drahtmateriales. Es bestehen inbezug auf Rohre folgende Vorschriften: Papierrohre müssen einen Metallüber-

zug haben. Drahtverbindungen innerhalb der Rohre sind nicht statthaft. Die lichte Weite der Rohre, die Zahl und der Radius der Krümmungen sowie die Anzahl und Lage der Verbindungsdosen müssen so gewählt sein, daß man die Drähte leicht einziehen und entfernen kann.

In ein und dasselbe Rohr dürfen nur Leitungen desselben Stromkreises (im Sinne von Fig. 98) verlegt werden. Wenn Leitungen bei Wechsel- oder Mehrphasenstrom* in Eisenrohren liegen oder sonst mit Eisen umgeben sind, müssen sämtliche zu einem Stromkreise gehörige Leitungen in einer einzigen Eisenhülle enthalten sein (die algebraische Summe der durch die Eisenhülle gehenden Ströme muß in jedem Augenblick gleich Null sein). Man vermeidet dadurch Spannungsabfälle durch Selbstinduktion** und unzulässige Erwärmung der Rohre.***

Rohre für mehr als einen Draht müssen mindestens 11 mm lichte Weite haben. In Metallrohren, auch solchen mit Längsschlitz, ohne isolierende Auskleidung müssen Gummiadern verwendet werden; es ist jedoch auch bei isolierten Rohren die Gummiader zweckmäßig als Norm anzusehen.

Die Isolierung der Leitungen darf durch vorstehende Teile und scharfe Kanten in den Rohren nicht gefährdet sein. Die Rohre sind so zu verlegen, daß Wasseransammlung ausgeschlossen ist. In feuergefährlichen und explosionsgefährlichen Betriebsstätten und Lagerräumen, sowie in Schaufenstern und Warenhäusern müssen Rohrsysteme angewendet werden..

Isolierrohre mit gefalztem Metallmantel werden für die lichten Durchmesser

$$d = 7,\ 9,\ 11,\ 13{,}5,\ 16,\ 23,\ 29,\ 36 \text{ und } 48\,\text{mm}$$

hergestellt. Als Metallmäntel kommen in Frage: Messing und Eisen (letzteres lackiert, galvanisch vermessingt oder galvanisch verbleit).

Isolierrohre mit glattem Eisenmantel besitzen die normalen Durchmesser:

$$d = 7,\ 9,\ 11,\ 13{,}5,\ 16,\ 21,\ 29,\ 36 \text{ und } 42\,\text{mm}.$$

Die Dicke der gefalzten Metallmäntel erstreckt sich von 0,13 bis 0,29 mm, die der glatten von 1,25 bis 2,5 mm; die Verbindung der Rohre und Rohrwinkel mit gefalztem Metallmantel untereinander und mit den Dosen erfolgt durch Muffen, die mit Asphaltkitt angeheftet und abgedichtet werden. Glatte Eisenmäntel werden mit Muffen aneinandergeschraubt. Rohrenden werden mit Porzellantüllen versehen.

Bei Wand- und Deckendurchführungen können die Drähte entweder durch weite Kanäle frei durchgespannt werden, oder es sind haltbare ganze Rohre aus Isoliermaterial zu verwenden, und zwar für jede einzeln ver-

* Vgl. § 39 F.
** Vgl. § 116 A.
*** Vgl. § 68 D, Hysteresisarbeit.

legte Leitung und für jede Mehrfachleitung je ein Rohr. Diese Durchführungsrohre (aus Glas, Porzellan, Hartgummi, Bergmannrohr mit Metallmantel) müssen an den Enden mit Tüllen aus feuersicherem Isoliermaterial (Porzellan) versehen und so weit sein, daß die Drähte leicht darin bewegt werden können. In feuchten Räumen und zur Durchführung ins Freie werden, falls nicht frei durchgespannt wird, Rohre aus Porzellan verwendet, deren Enden nach Art der Isolierglocken ausgebildet sind. Fig 76 zeigt ein Durchführungsstück für Hochspannung mit an der Außenseite befindlichem Doppeltrichter zur Durchführung durch eine Blechwand.

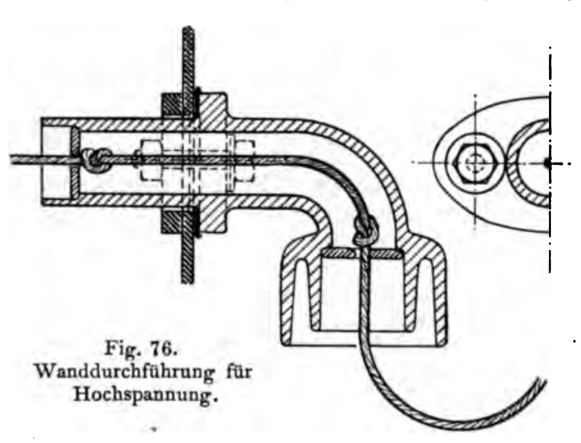


Fig. 76. Wanddurchführung für Hochspannung.

Über Fußböden stehen Durchführungsrohre zur Fernhaltung des Scheuerwassers mindestens 10 cm vor. Sie werden gegen den Fußboden abgedichtet und sind gegen mechanische Beschädigung zu schützen.

Armierte Bleikabel, Panzeradern und betriebsmäßig geerdete Leitungen können mit Schutz gegen Mauerfeuchtigkeit ohne weiteres durch die Wand geführt werden. Wanddurchführungen bei Rohrsystemen werden ohne Unterbrechung des Systemes seinen Grundsätzen gemäß vorgenommen.

§ 41. Ausschalter.

Allgemeines. Ausschalter haben die Aufgabe erstens einen Strom von bestimmter Stärke gut durchzulassen, und zweitens eine bequeme Unterbrechung zu ermöglichen. Sie bestehen, wie schon in § 14 angegeben wurde, aus den auf Isoliermaterial angebrachten Kontakten, zwischen denen ein stromleitendes Schlußstück eingeschaltet werden kann.

Die erste Aufgabe, den Strom gut durchzulassen, ist so zu verstehen, daß die Ausschalter sich bei Stromdurchgang nicht unzulässig erwärmen dürfen. Man läßt als höchste Übertemperatur bei Hebelausschaltern (in Betriebsräumen verwendbar) 50^0, bei Dosenausschaltern (Drehschaltern, überall verwendbar) 10^0 zu. Die im Ausschalter entwickelte Wärme ist nach dem Jouleschen Gesetz dem Quadrat der Stromstärke, dem Widerstand und der Zeit proportional. Strom und Zeit sind durch den Betrieb vorgeschrieben, daher muß der Widerstand des Ausschalters klein bemessen sein. Der Widerstand des Ausschalters setzt sich zusammen aus dem Widerstand seiner Metallwege und dem

Übergangswiderstand der Kontaktstellen. Daher erfordert Aufgabe 1: gut leitendes und im Querschnitt an allen Stellen genügend bemessenes Leitermaterial (Kupfer, Messing) sowie blanke, gut und fest aufliegende und genügend bemessene Kontakte, die beim Einschalten aufeinander schleifen. Bei einem nach diesen Grundsätzen hergestellten Ausschalter hält sich im normalen Stromdurchgang zwischen seinen Anschlußstellen nur eine verschwindend geringe Spannung auf.

Für die zweite Aufgabe, den Strom bequem zu unterbrechen, sind folgende Punkte von Wichtigkeit: Wird das stromleitende Verbindungsstück unter Strom aus den Kontakten herausgezogen, so entsteht zunächst ein Lichtbogen. Dieser Lichtbogen wird durch die Schaltbewegung verlängert, bis er abreißt. Durch den Lichtbogen fügt sich in den Stromkreis ein mit der Schaltbewegung sich vergrößernder Widerstand ein, der den Strom bis zum Abreißen schwächt, und der während des Ausschaltens immer mehr die Spannung auf sich zieht. Bei unterbrochenem Strom schließlich ist der Widerstand des Ausschalters unendlich groß, es liegt zwischen den Kontakten die ganze Spannung beim Strome Null. Beim Ausschalten tritt an den Kontakten eine Arbeit auf, die sich als Summe aller Werte $E \cdot i \cdot t$, die am Ausschalter während des Unterbrechervorganges auftreten, darstellt. Dabei bedeutet E die bei der Schaltbewegung steigende Spannung zwischen den Kontakten, i die bei der Schaltbewegung abnehmende Stromstärke und t die sehr kleine Zeitdauer, für welche die augenblicklichen Werte E und i gerade gültig sind. Diese Arbeit setzt sich durch den Lichtbogen in Wärme um, wobei die Hauptmenge der Wärme an den Angriffstellen des Lichtbogens, und zwar hauptsächlich am positiven Pol, auftritt. Diese Wärmemengen verschmoren die letzten Angriffstellen und bilden dort Perlen, tragen also zur allmählichen Zerstörung des Ausschalters bei. Die zweite Aufgabe wird daher näher gekennzeichnet: die Unterbrecherwärme darf den Ausschalter je nach den Betriebsverhältnissen nur um ein Minimum schädigen. Das wird für gewöhnliche Ausschalter um so mehr erfüllt, je mehr die Unterbrechungswärmemenge gering gehalten wird. Für gegebene Netzspannung und gegebene Stromstärke bleibt nur übrig, zur Verringerung dieser Wärmemenge die Zeitdauer des Ausschaltens zu verkürzen. Ein gegen die Unterbrecherstelle gerichteter starker Luftstrom wirkt fördernd auf die Unterbrechung.

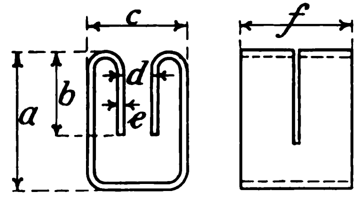


Fig. 77. Kontaktfeder.

Als Isolationsmittel der Ausschalter kann infolge der Lichtbogen nur unverbrennliches Material (meistens nur Porzellan, Glas, Schiefer und Marmor, jedoch kein Holz!) verwendet werden.

Die Verwendung von Quecksilberkontakten hat sich überlebt. Es kommen für die Kontaktstellen nur feste Metalle und Kohle in Frage.

Die normale Betriebsstromstärke und Spannung, für die ein Schalter gebaut ist, sind auf dem festen Teil zu vermerken.

An den Kontakten der Hebelschalter sind für gut federndes Messing oder Kupfer etwa folgende Maße gebräuchlich (vgl. Fig. 77):

Normalstrom	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
15 Amp.	18	12	11	3	0,6	10 mm
30 „	20	14	13	4	0,8	12 „
60 „	26	18	16	5	1,2	15 „
100 „	32	23	21	6	1,5	20 „
200 „	48	32	30	8	2	28 „

Die Unterbrechung kann grundsätzlich an einer beliebigen Stelle eines Stromkreises vorgenommen werden. Gewöhnlich wählt man dazu den einen oder den anderen Zuleitungsdraht. Man bezeichnet eine solche Unterbrechung als „einpolig“. Technisch zulässig ist einpolige Unterbrechung in Stromverbrauchskreisen nur an einzelnen Glühlampengruppen hinter 6-Ampere-Sicherungen (vgl. Fig. 98)..

Nun hat die einpolige Ausschaltung den Nachteil, daß der ausgeschaltete Stromkreis immer mit dem anderen Pol in Verbindung bleibt, also auch Spannung gegen die Umgebung und gegen Erde haben kann. Ist nun, vielleicht zufällig, derjenige Pol der Stromquelle, an dem der Ausschalter liegt, mit der Erde leitend verbunden, so kann auch an dem abgeschalteten Kreise durch eine Verbindung mit der Erde ein Kurzschluß entstehen, oder es können an feuchten Stellen zersetzende Wirkungen gegen Erde hin sich einstellen. Man vermeidet diese Nachteile durch „zweipolige“ Abschaltung, d. h. jeder Zuleitungsdraht, sowohl der positive, wie auch der negative, enthält einen Ausschalter, und zwar beide in direkter Kupplung. „Dreipolige“ Ausschalter schließlich gibt es bei Dreileitersystemen und bei Drehstrom. Der geerdete Mittelleiter in Dreileitersystemen soll entweder nicht, oder nur mit den Außenleitern zwangläufig zusammen abschaltbar sein.

Als Anhaltspunkte für die Länge der Lichtbogen zwischen Metallkontakten dienen folgende* Werte, die für Gleichstrom Gültigkeit haben, und die so gewonnen sind, daß die Stromquelle auf eine bestimmte Voltzahl gebracht wurde, während der angegebene Strom durch Verwendung gewöhnlicher Draht- bzw. Glühlampenwiderstände (nicht Spulen!) eingestellt wurde. (Siehe Tabelle S. 106.)

Es hat sich herausgestellt, daß die Lichtbogenlängen nahezu unabhängig von Größe und Form der Kontakte** und nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit der Schaltbewegung sind. Für Spannungen über 100 Volt ist die Länge des Unterbrecherlichtbogens bei zweipoliger Unterbrechung ebenso groß, wie bei gleicher Stromstärke mit

* Von Russell und Patterson (s. ETZ. 1902, S. 894) beobachtete.

** Etwas länger zwischen Spitzen.

Volt	Amp.	Einpolige Unterbrechung		Zweipolige Unterbrechung.	
		Max. Länge des stehenbleibenden Lichtbogens cm	Länge des Unterbrechungs-Lichtbogens cm	Max. Länge des stehenbleibenden Lichtbogens cm	Länge des Unterbrechungs-Lichtbogens cm
100	5	0,1	0,8		
	15	0,5	2,2	0,06	0,48
	22	0,8	2,9	0,07	0,6.
200	5	1,0	2,2	0,4	0,8
	11	1,2	4,2	0,7	1,65
	18	1,5	5,9	0,8	2,5
300	3,5	1,2	3,4	0,7	1,2
	6	1,4	5,1	1,0	1,9
	11	1,5	8,0	1,2	3,0
	21	2,2	11,5	1,4	4,5

halber Spannung und einpoliger Unterbrechung, d. h. bedeutend kürzer, als die Hälfte der Lichtbogenlänge bei einpoliger Unterbrechung. Die Erscheinung ist der abkühlenden Wirkung der Kontakte zuzuschreiben. Es folgt daher für die Unterbrechung in schwierigen Fällen ein Vorteil aus der Anwendung möglichst vieler gleichzeitig in Wirksamkeit tretender hintereinandergeschalteter Unterbrecherstellen.*

A. Kontaktstöpsel.

Die Abbildung eines Stöpselschalters (Fig. 78) zeigt ohne weiteres, daß er zwar für den Durchgang hoher Stromstärken bei genügender Bemessung, sauberer Bearbeitung und fester Einpressung geeignet ist, daß aber eine Stromunterbrechung, besonders bei höheren Spannungen, infolge des kurzen Abstandes seiner feststehenden Kontakte durch den entstehenden Lichtbogen an ihm nicht möglich ist. Daher wird er in der Starkstromtechnik nur für stromlose Umschaltung verwendet.

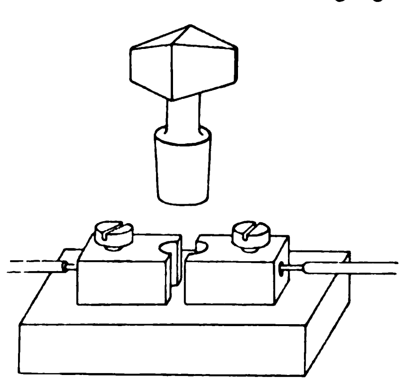


Fig. 78. Kontaktstöpsel.

B. Hebelausschalter.

Einfache Hebelausschalter zeigen die Figuren 79 und 80. Auf einem „Stein", einem isolierenden Fundament aus Marmor, Schiefer oder Porzellanmasse befindet sich oben ein mit Federn nach Fig. 77 versehener Kontakt, während an der unteren Anschlußstelle das strom-

* Weitere Nutzanwendung findet diese Erscheinung bei den Rollen-Blitzschutzvorrichtungen, den Steuerschaltern und den Fahrdraht-Trennstücken.

leitende Verbindungsstück, der „Hebel“ oder das „Messer“, drehbar ist. Eine federnde Rosette vermittelt an den abgebildeten Hebelschaltern einen guten Stromübergang am Drehpunkt. Die aufrecht stehende Lage des Hebels verhindert ein unbeabsichtigtes Zufallen.



Fig. 79. Einpoliger Hebelschalter.



Fig. 80. Zweipoliger Hebelschalter.

Für die isolierenden Griffe und bei mehrpoligen Hebelausschaltern auch für Kuppelstangen ist die Verwendung von Holz zugelassen.

Die bereits erwähnte zulässige höchste Übertemperatur von 50° gilt an Hebelausschaltern für die Kontakte.

Hebelausschalter dürfen nur in elektrischen Betriebsräumen, wo also geschultes Personal zur Bedienung in Frage kommt, verwendet werden und bedürfen eines äußeren Schutzes nicht.

Bei Unterbrechung unter vollem Strom wird das Messer der Hebelschalter zum Schutz der Kontakte kurz herausgerissen. Die Kontakte an den Hebelschaltern stellt man auswechselbar her. Häufig wird der Drehpunkt des Messers stromlos gemacht, d. h. man ordnet auf isolierender Grundlage an jedem Messer zwei Federkontakte an, je einen für Zuleitung und Fortleitung. Diese Anordnung hat den Vorzug leichterer Überwachung und Auswechselbarkeit der Kontakte.

Außer den hier behandelten Hebeln gibt es noch ein- und mehrpolige Umschalthebel, bei denen das Messer in einen oberen oder in einen unteren Kontakt eingelegt wird, je nach dem Weg, den der Strom geleitet werden soll.

Für große Stromstärken unterteilt man die Leitermaterialien in eine Anzahl kupferner Lamellen, von denen jede für sich einzeln federt und Luftabstand zur benachbarten hat. Das ist die wirksamste Art der Vergrößerung der Kontaktflächen, und zugleich erreicht man dadurch eine gute Luftkühlung. Die häufigste Ausführungsform ist diejenige, bei der gegossene massive Kontaktgabeln aus Kupfer (bisweilen mit Rippen zur besseren Kühlung) auf dem Steinfundament durch von der Rückseite kommende kupferne Anschlußbolzen befestigt werden. Das selbst nicht stromdurchflossene Messer ist nur Träger für die

rechts und links befindlichen, durchgehenden, federnden Kupferlamellen, die sich zwischen die Kontaktgabeln pressen. Einen Ausschalter dieser Art zeigt Fig. 81.

Nun haben die lamellierten Ausschalter ohne weiteres den Nachteil, daß bei Unterbrechung unter vollem Strom die Lamellen leicht

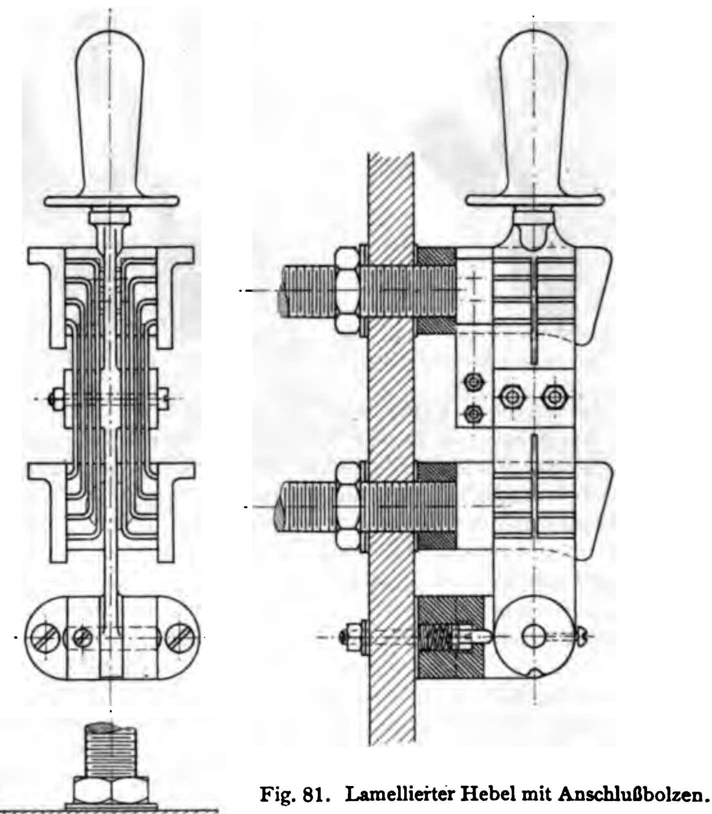


Fig. 81. Lamellierter Hebel mit Anschlußbolzen.

verschmoren, denn der Lichtbogen greift an der letzten Berührungsstelle, also an einer Lamelle an, die selbst nicht viel Wärmemenge infolge ihrer geringen Masse aufnehmen kann. Eine massive Kontaktgabel hingegen leitet die entstehende Wärmemenge von der Lichtbogen-Angriffstelle aus schnell zu dem übrigen Material hin und verschmort dadurch bedeutend weniger. Durch diesen Hinweis wird klar, welche Aufgabe die beiden in Fig. 81 angedeuteten kupfernen Klötze hinter dem Messer haben: sie dienen

zum Schutz der Lamellen, denn nun findet die letzte Unterbrechung zwischen großen Metallmassen statt, nämlich der massiven Gabel einerseits und den massiven Hilfskontakten anderseits. Die Hilfskontakte Federn für sich und etwaige Schmorstellen und Perlen an ihnen hindern nicht einen guten Stromdurchgang an den Lamellen. Damit Perlen an der Gabel nicht stören können, öffnet sich die Gabel mit einer großen Abrundung, der die Hilfskontakte beim Ausschalten teilweise folgen. Die Federn der Hilfskontakte können dünn sein, denn sie sind nur kurze Zeit* vom vollen Strom während der Schaltbewegung durchflossen. In voller Einschaltstellung liegen sie parallel zu den Lamellen und führen, da die Lamellen bedeutend geringeren Widerstand haben, nur einen schwachen Strom.

Nebenschlüsse dieser und ähnlicher Art treten bei allen Ausschaltern für größere Leistungen auf. Bisweilen verwendet man an den letzten Berührungsstellen statt der Metallmassen leicht auswechselbare Kohlen, da Kohle nicht schmort und bäckt. Schließlich sind in diesen Nebenschlüssen bisweilen magnetische Ausblasvorrichtungen angebracht.**

Ein weiteres und in gewöhnlichen Fällen viel angewandtes Mittel zur Verringerung der Schmorstellen an Ausschaltern sind die Schnappvorrichtungen. Ein Beispiel hierfür bildet der Schnappschalthebel der Fig. 82 (Bergmann), der zunächst als zweipoliger Ausschalter mit stromlosem Drehpunkt erkannt wird. Über das Messer legt sich ein zweiter kastenförmiger Hebel, der um dieselbe Achse, wie das Messer, drehbar ist. Er ist mit dem Messer durch eine in der Figur verdeckte Feder verbunden. Im ersten Augenblick der Schaltbewegung zieht man nur den oberen Hebel ohne das Messer zurück und spannt die Feder. Erst wenn zwischen den Hebeln die Federkraft groß genug geworden ist, oder wenn ein Anschlag das Messer frei gemacht hat, schnappt es aus den Kontakten heraus. Schnappschalter müssen vermieden werden, wo der zu unterbrechende Strom viele Windungen durchfließt.***



Fig. 82. Bergmann-Ausschalter.

* Vgl. Joulesches Gesetz.

** Vgl. diese in § 67, 8. Versuch (Kraftwirkung zwischen Strom und Feld), sowie bei den Hörnerausschaltern.

*** Vgl. § 67, 11. Versuch und weiteres über Selbstinduktion.

C. Hörnerausschalter.

Hörnerausschalter beruhen darauf, daß eine einmal eingeleitete Stromschleife nach den dynamischen Gesetzen das Bestreben hat, sich zu vergrößern. Dieses Bestreben wird erklärt durch die sich jedesmal gegenüberliegenden parallelen und entgegengerichteten Ströme (vgl. Fig. 83), die einander abstoßen. Bei einem Drahtlauf hindern die mechanischen Kräfte des Materiales an der Vergrößerung der Schleife, bei einem Lichtbogen aber steht der Bewegung der Stromfäden nichts

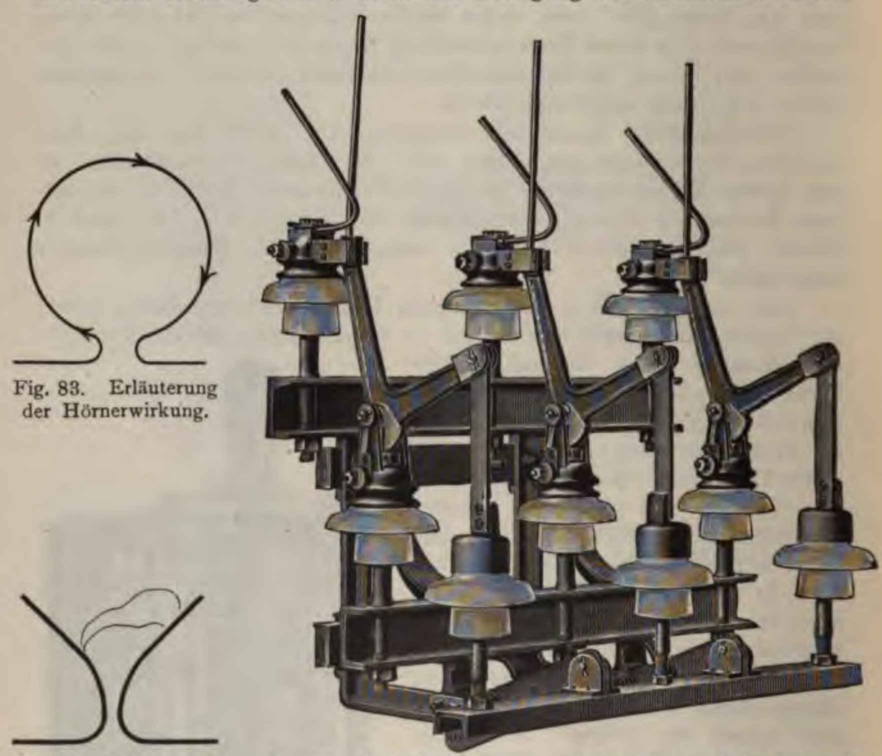


Fig. 83. Erläuterung der Hörnerwirkung.

Fig. 84. Hörnerpaar.

Fig. 85. Dreipoliger Hörnerausschalter (Siemens-Schuckertwerke).

entgegen. Werden die in Fig. 84 angedeuteten Kupferhörner zuerst zur Berührung gebracht und dann ein wenig nach rechts und links auseinanderbewegt, so entsteht der erste Lichtbogen infolge der Form der Hörner bereits höher, als die Stromzuführung, d. h. die Schleife ist eingeleitet und der Lichtbogen klettert sofort an den Hörnern aufwärts, bis er abreißt. Diese und ähnliche* Anordnungen im Nebenschluß zu den Hauptkontakten, die zuerst ausgeschaltet werden, finden

* Weiteres über magnetische Ausblasung folgt in § 67, 8. Versuch (Kraftwirkung zwischen Strom und Feld).

sich vor allem bei Hochspannungsausschaltern. Einen auf dem Hörnerprinzip beruhenden Hochspannungsausschalter (dreipolig) zeigt Fig. 85. Man erkennt daran für jeden Pol die beiden auf Isolierglocken sitzenden Hauptkontakte; an dem unteren Kontakt dreht sich der Stromschlußhebel. Die Angriffstelle dieses Hebels ist ebenfalls mit je einer Glocke isoliert. Die drei Glocken der letzteren Art sind auf einer gemeinsamen, geführten Schiene angeordnet, die durch das Gestänge des oben am Mast oder über den Schalttafeln angebrachten Apparates bewegt wird. Über den Hauptkontakten befinden sich die aus Kupferdraht hergestellten Nebenschlußkontakte, die während des Herausziehens der Hauptkontakte aufeinander schleifen und sich erst dann voneinander entfernen, wenn an den Hauptkontakten unterbrochen ist.

D. Ölausschalter.

Unter Öl* fällt ein Lichtbogen auch bei der Unterbrechung großer Leistungen sehr kurz aus, wozu die starke Kühlwirkung des Öles und die Abwesenheit der Luft das meiste beiträgt. Wesentlich ist, daß über der Unterbrecherstelle ein genügend hoher Ölstand vorhanden ist, und daß das Öl in genügende Bewegung gerät, denn eine Anzahl kleinster Kohleteilchen bleiben auf der Bahn des Lichtbogens zurück und müssen auseinandergebracht werden. Auch ist durch die allmähliche Ansammlung der Kohleteilchen nach oftmaligem Gebrauch eines Ölschalters das Öl zu erneuern. Es kann dazu jedes gute Schmieröl und das zu Isolationszwecken hergestellte Harzöl verwendet werden. Selbst bei den höchsten vorkommenden Spannungen haben sich Ölschalter gut bewährt, und es ist nur der eine Nachteil vorhanden, der bei sehr schneller Unterbrechung überhaupt auftritt,** daß bei Vorhandensein von Spulen im unterbrochenen Kreise (Maschinen und Transformatoren) leicht ein Durchschlag der Isolation erfolgt, und zwar um so leichter, je besser die Pole der abgeschalteten Anlage gegeneinander isoliert sind. In solchen Fällen ist die Ver-



Fig. 86. Ölausschalter (Voigt & Haeffner).

* Ebenso jeder unter anderen isolierenden Flüssigkeit, wie Alkohol, destilliertem Wasser usw., was jedoch für die Ausschaltertechnik nicht in Frage kommt.

** Vgl. unter B dieses Paragraphen das bei Schnappschaltern Gesagte und spätere Bemerkungen unter Selbstinduktion.

wendung weniger plötzlich abtrennender Ausschalter, z. B. der Hörnerausschalter, geboten.

Fig. 86 zeigt einen Ölausschalter von Voigt & Haeffner, der für 3000 Volt und 40 Ampere bei Antrieb durch ein Handrad zum Gebrauch an Schalttafeln bestimmt ist. Der mit Öl zu füllende Kasten ist im Bilde abgenommen.

E. Installations-Ausschalter (Dreh- oder Dosenschalter).

Die bisher behandelten Ausschalter werden nur von unterwiesenem Personal bedient, während die Installationsschalter von jedermann zu bedienen sind. Diese Verwendung erfordert andere Ansprüche.

a) Die ein- und auszuschaltende Leistung geht über die einer Lampengruppe oder eines kleinen Motors (Ventilator usw.) nicht hinaus.

b) Es kommen nur die Gebrauchsspannungen (bis 250 Volt) in Frage.

c) Die Schaltbewegung besteht nach dem Vorbilde des Gashahnes aus einer Drehbewegung.

Außer den im allgemeinen Teil dieses Paragraphen erwähnten Punkten sind für Installationsschalter noch folgende Vorschriften und Regeln von Bedeutung:

Metallkontakte sollen Schleifkontakte sein. Alle Schalter, welche außerhalb elektrischer Betriebsräume verwendet werden sollen, müssen Augenblicksschalter sein. Beim ordnungsmäßigen Öffnen unter normalem Betriebsstrom darf kein dauernder Lichtbogen entstehen. Eine einmal eingeleitete Bewegung muß entweder die normale Ausschaltstellung oder die normale Einschaltstellung zur Folge haben. Zwischenstellungen und die Möglichkeit für ordnungswidriges Funkenziehen müssen ausgeschlossen sein. Drehung im verkehrten Sinn darf keine nachteiligen Folgen haben. Schalter außerhalb elektrischer Betriebsräume müssen Gehäuse haben. So wie bei den Leitungen darf kein spannung- bzw. stromführender Teil bloßliegen. Gehäuse, soweit sie der Berührung zugänglich sind, und Griffe müssen aus nicht leitendem Material bestehen oder mit einer haltbaren Isolierschicht überzogen sein. Ausschalter an Lampenfassungen sind nur bis 250 Volt zulässig. Handlampen dürfen keinen Ausschalter in der Lampenfassung besitzen. In feuergefährlichen Betriebsstätten ist auf besonders sichere Schutzhüllen aus isolierendem Material zu achten. In explosionsgefährlichen Räumen dürfen Ausschalter überhaupt nicht angebracht werden, in feuchten Räumen sind sie nach Möglichkeit zu vermeiden. In Schaufenstern und Warenhäusern usw. müssen die Schalter an solchen Plätzen fest angebracht sein, an welchen sie vor der Berührung mit leicht entzündlichen Stoffen




Fig. 87. Drehschalter älterer Art.

sicher geschützt sind; außerdem sind sie mit widerstandsfähigen Schutzkästen zu umgeben.

Ausführungsformen von Drehschaltern zeigen die Figg. 87 bis 89; Fig. 87 stellt einen älteren einpoligen Ausschalter von Voigt & Haeffner dar, an dem zwei Kontakte gegenüber auf einem Porzellanstein befestigt sind.

Ein drehbares lamelliertes Schlußstück verbindet entweder die Kontakte oder steht quer zur Verbindungslinie. Diese beiden Stellungen werden mit Hilfe eines am Drehstück befestigten vierkantigen Kopfes, gegen den sich flache Federn legen, gesichert. Es ist hierbei Vorwärts- und Rückwärtsdrehung möglich. Dieses einfache Mittel des Vierkantes mit Federn hat den Nachteil, daß bei vorsichtigem Drehen mit festgehaltenem Griff ein dauernder Lichtbogen entstehen kann, so lange man den Griff festhält. Dieser Nachteil hat dazu geführt, die einfachen Drehschalter dieser Art zu verlassen oder nur bis zu 120 Volt zu verwenden und an ihre Stelle ein komplizierteres System zu setzen, bei dem auch bei langsamster Bewegung des festgehaltenen Griffes das Ein- und Ausschalten sprungweise erfolgt. Es werden durch die Drehbewegung Federn gespannt, die bei einer bestimmten Stellung des Griffes frei werden und vermittels ihrer vorher aufgespeicherten Arbeit die Schaltbewegung zu Ende führen, wenn die scharfe Grenze für die Drehung des Griffes erreicht oder überschritten ist. Ist die Grenze nicht erreicht, so geht das Schlußstück durch Federkraft in die frühere Stellung (normale Ausschalt- oder normale Einschaltstellung) zurück. Nach diesem Grundsatz arbeitet der in Fig. 88 dargestellte einpolige Drehschalter von Voigt & Haeffner, bei dem die Kontakte im wesentlichen ebene Form haben (die Ebene normal zur Drehachse); Fig. 89 gibt einen auf demselben Grundsatz beruhenden zweipoligen Ausschalter der Siemens-Schuckertwerke



Fig. 88. Augenblicksschalter (Voigt & Haeffner).



Fig. 89. Zweipoliger Augenblicksschalter (Siemens-Schuckertwerke).

wieder, bei dem bis zur Auslösung eine Trommel, die die beiden Schlußstücke enthält, ein Stück in Richtung der Achse verschoben wird. Dadurch wird es nötig den Kontakten im wesentlichen die Form von Zylindermantelteilen zu geben.

§ 42. Die Schmelzsicherungen.

Allgemeines. Die Aufgabe der Schmelzsicherungen ist in § 19 dargetan, wo gesagt ist, daß sie zum Schutz von Stromquellen, Leitungen und Apparaten gegen zu starke Ströme dienen, und zwar unter Verwendung der Stromwärme. Die Notwendigkeit eines solchen Schutzes ergab sich nach § 30, D unter Berücksichtigung dessen, daß der Widerstand von Stromquellen und Leitungen gering gehalten werden muß, daß also bei zu starker Beanspruchung eines Kreises oder bei gegenseitiger Berührung zweier an verschiedenen Polen liegender Leitungsdrähte sich nach dem Ohmschen Gesetz ein zu starker Strom einstellt. Der zu starke Strom könnte die durchflossenen Teile unzulässig hoch erwärmen und dadurch Schaden bringen. Also man benutzt die gefürchtete Stromwirkung, die Wärme, selbst, indem man sie an geeigneter Stelle an einem Schmelzstreifen auftreten läßt, bis er durchbrennt und unterbricht. Bedeutet i (Ampere) den Strom und w (Ohm) den Widerstand des Schmelzstreifens, während t die Zeit des Stromdurchgangs (Sekunden) sein soll, so ist die entwickelte Wärmemenge Q (Joule):

$$Q = i^2 \cdot w \cdot t.$$

Behielte ein Schmelzstreifen alle zugeführte Wärme für sich, so würde seine Temperatur* sich fortwährend steigern, solange der Strom fließt, denn die Temperatursteigerung einer bestimmten Materialmenge ist* proportional zur zugeführten Wärmemenge. Ein noch so schwacher Strom würde unter obiger Bedingung jeden beliebigen Streifen nach genügend langer Zeit schließlich zum Schmelzen bringen. Wendete man dagegen eine genügend starke Kühlung an, so daß alle entstehende Stromwärme sofort weggenommen wird, so würde jeder auch noch so dünne Streifen einen beliebig starken Strom führen können, ohne zu schmelzen. In den Gebrauchsfällen liegen die Verhältnisse zwischen den beiden oben genannten Fällen: Der Schmelzstreifen wird bei mäßigem Strom mäßig warm. Seine Temperatur stellt sich bis zu der Höhe ein, wo die sekundlich vom Strom zugeführte Wärmemenge gleich ist der vom Streifen aus in seine Umgebung hin sekundlich abgegebenen Wärmemenge. Eine Stromsteigerung hat daher auch stets eine Temperatursteigerung zur Folge, bis die Schmelztemperatur erreicht ist, wo eine weitere Wärmezufuhr das feste Material verflüssigt.

Für schnelles Durchbrennen einer Sicherung kann die vom Streifen abgegebene Wärme vernachlässigt werden; alsdann gilt nach dem Jouleschen Gesetz, daß ein Streifen von seiner normalen Temperatur

* Ohne Berücksichtigung einer Aggregatszustandsänderung.

aus erhitzt durch den doppelten Strom in $^1/_4$ der Zeit, durch den dreifachen in $^1/_9$ der Zeit usw. unterbricht. Es wird bei jeder noch so hohen Stromstärke immerhin eine bestimmte Zeit bis zum Durchbrennen erforderlich sein. Die Überlegung sagt, daß ein Schmelzstreifen bisweilen bedeutend höhere Ströme zu unterbrechen hat, als er bei Dauerstrom unterbricht. Die Sicherungen werden gewöhnlich so bemessen, daß sie, vom kalten Zustande aus plötzlich mit der doppelten Normalstromstärke belastet, nach längstens 2 Minuten abschmelzen.

Die Normalstromstärke, die ein Streifen noch verträgt, und die Maximalspannung, für die die Sicherung verwendet werden darf, ist den Verbandsvorschriften gemäß auf dem Einsatz, der den Schmelzstreifen enthält, zu verzeichnen. Für die Normalstromstärken sind dieselben Abstufungen zu wählen wie die Stromabstufungen bei den Leitungsquerschnitten, so daß z. B. (vgl. die Tabelle unter § 40, C) eine Kupferleitung von 4 qmm höchstens mit einem Sicherungsstreifen von 20 Ampere Normalstromstärke geschützt sein darf;* oder hinter einem 35-Amperestreifen darf keine dünnere Leitung liegen, als 10 qmm. Da Sicherungen Stromunterbrecher sind, gilt für sie die Vorschrift wie bei Ausschaltern: es muß dafür gesorgt sein, daß ein dauernder Lichtbogen nicht stehen bleiben kann; dieser Punkt ist bei Sicherungen von ganz besonderer Bedeutung, weil die Unterbrecherstromstärke bedeutend höher werden kann als die normale, was vor allem empfindlich hervortritt, wenn sich die Sicherung direkt zwischen den Polen einer Akkumulatorenbatterie befindet. Schnell durchgehende Sicherungen erzeugen eine explosionsartige Erscheinung, die bei schlechten Konstruktionen die umgebenden Teile zertrümmert und verschmort. Langsam, d. h. mit allmählich gesteigertem Strom durchgehende Sicherungen zeigen nur geringe Lichterscheinung, und der Schmelzstreifen selbst bleibt teilweise erhalten. Brennbare Teile sind der Umgebung von Sicherungen fernzuhalten. Für die Gehäuse und Fundamente kommen nur feuersichere Materialien in Frage. Kurze Schmelzstreifen gleichen Materiales und gleicher Querschnittsbemessung brennen unter sonst gleichen Verhältnissen erst bei höheren Stromstärken durch, als lange, da die Anschlußstellen Wärme ableiten. Für die Durchmesser etwa 20 cm langer chemisch reiner Silberdrähte in Asbestrohren mit Luftzutritt gelten folgende Zahlen:

Normalstrom	Schmelzstrom für 2 Min.	Durchm. d	Normalstrom	Schmelzstrom für 2 Min.	Durchm. d
Amp.	Amp.	mm	Amp.	Amp.	mm
1	2	0,1	20	40	0,7
2	4	0,15	25	50	0,8
4	8	0,3	35	70	1,0
6	12	0,4	60	120	1,5
10	20	0,5	80	160	1,8
15	30	0,6	100	200	2,1

* Vorschriften bei Glühlampenkreisen s. w. u.

Beispiel. Für einen Schmelzstreifen aus Silber für 30 Ampere vom Durchmesser $d = 0,9$ mm soll die für das Durchschmelzen von Zimmertemperatur aus ($\tau_1 = 15^0$) erforderliche Zeit berechnet werden unter der Voraussetzung, daß alle Stromwärme auf dem Schmelzstreifen verbleibt, und zwar:

a) für plötzliches Auftreten eines konstanten Stromes $i_1 = 60$ Amp.,
b) „ „ „ „ „ „ $i_2 = 300$ Amp.

Der Berechnung sei die (an und für sich gleichgültige) Länge von $l = 20$ cm zugrunde gelegt. Für das Silber seien folgende Zahlen in Rechnung gesetzt:

spezifisches Gewicht . . . . $s = 10,5$ g/ccm,
spezifische Wärme . . . . $\sigma = 0,0559$ Kal./kg und 1^0,
Schmelztemperatur . . . . $\tau_2 = 999^0$ Cels.,
Schmelzwärme . . . . $q' = 21,07$ Kal./kg,
spezifischer Widerstand für die mittlere
in Frage kommende Temperatur . . $c = 0,06$ Ohm/m und 1 qmm.

Es gilt der Ansatz:

Steigerungswärme + Schmelzwärme = Stromwärme.

$$l_{cm} \cdot d^2_{cm} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot s \cdot \frac{1}{1000} \left[\sigma \cdot (\tau_2 - \tau_1) + q'\right] = 0,00024 \cdot i^2_{Amp.} \cdot w_{Ohm} \cdot t_{Sek.};$$

daraus folgt:

$$t_{Sek.} = \frac{l_{cm} \cdot d^2_{cm} \frac{\pi}{4} \cdot s \cdot \frac{1}{1000} \left[\sigma \cdot (\tau_2 - \tau_1) + q'\right]}{0,00024 \cdot i^2 \cdot \frac{l_m}{d^2_{mm} \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot c};$$

das ergibt für:

$$\text{a)} \quad t = \frac{20 \cdot 0,0081 \cdot \pi \cdot 10,5 \cdot [0,0559 \cdot (990 - 15) + 21,07] \cdot 0,81 \cdot \pi}{0,00024 \cdot 3600 \cdot 0,2 \cdot 0,06 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 1000}$$

$= 6,23$ Sekunden;

$$\text{b)} \quad t = 6,23 \cdot \frac{60^2}{300^2} = 0,249 \text{ Sekunden.}$$

Obige Ergebnisse haben nur insofern eine Bedeutung, als sie in Annäherung die Geringstwerte der Zeit darstellen, unter denen die Dauer des Abtrennungsvorganges in keinem Fall liegen kann. In Wirklichkeit liegt bei normaler Wärmeabgabe des Streifens für Fall a) die Zeit näher an 120 als an 6,23 Sekunden.

Was unter § 41, E über die Anbringung von Ausschaltern in feuer- und explosionsgefährlichen, sowie in feuchten Räumen und in Schaufenstern usw. gesagt ist, gilt in gleicher Weise auch für Sicherungen.

Gleichfalls gilt für Sicherungen das, was in dem allgemeinen Teil von § 41 über die zwei- bzw. dreipolige Abschaltung gesagt ist, nur mit dem Unterschied, daß auch einzelne Glühlampenkreise zweipolig gesichert werden. Ein geerdeter Mittelleiter eines Dreileitersystemes darf nicht gesichert sein, ebenso dürfen die von den Gebrauchsgegenständen (Lampen usw.) zum geerdeten Mittelleiter führenden Leitungen keine Sicherungen enthalten.

Soll eine Leitung an einer Stelle zugleich ausschaltbar gemacht und gesichert werden, so empfiehlt sich von der Stromquelle aus die Reihenfolge „Ausschalter–Sicherung". Dadurch ist es möglich, vor dem Einsetzen der Schmelzstreifen die Zuleitung zu unterbrechen, was zur Vermeidung eines Stromes durch den menschlichen Körper und zur Vermeidung eines Kurzschlusses von Wichtigkeit ist.

Beim Einsetzen gewöhnlicher Sicherungsstreifen muß der Stromkreis an anderer Stelle unterbrochen sein, da sonst der Sicherungsstreifen in der Hand durchgehen kann.

Schmelzsicherungen werden angebracht:

1. Überall da, wo sich von der Stromquelle aus gerechnet der Querschnitt einer Leitung verringert.

Es kann sich dabei um die Verlängerung einer Leitung mit schwächerem Querschnitt oder um den Abzweig einer schwächeren von einer stärkeren Leitung handeln. Die Schemata hierfür geben die beiden Figg. 90 und 91, bei denen, wie im folgenden, die Sicherungen durch kleine Rechtecke angedeutet sind.

Punkt 1 ist dadurch begründet, daß bei einem Kurzschluß oder einer Überlastung im dünneren Teil der Leitung mehr Wärme, infolge des höheren Widerstandes, als im dicken Teil der Leitung auftritt. Es ist eine Stromstärke denkbar, die für die dicke Leitung zulässig, für die dünne aber unzulässig ist. In den Vorschriften des Verbandes ist es nachgelassen das Verbindungsstück von der Hauptleitung bis zur Sicherung, falls eine einfache Länge nicht mehr als 1 m beträgt, schwächer zu wählen, als die Hauptleitung; es ist aber in diesem Falle von entzündlichen Gegenständen feuersicher zu trennen und darf nicht aus verdrillten Schnüren hergestellt sein. Längere Verbindungsstücke müssen denselben Querschnitt wie die Hauptleitung besitzen.

2. Zum Schutz von Stromquellen und Apparaten.

Maschinen und Akkumulatoren, sowie Transformatoren können durch Überlastung Schaden leiden. Man sichert in solchen Fällen an beiden Polen* so, wie es die Schemata Figg. 92 bis 94 andeuten.

* Nicht immer sichert man die Verbindungsleitungen einer stromerzeugenden Maschine zur Schalttafel mit Rücksicht darauf, daß das Abtrennen einer vollbelasteten oder überlasteten Maschine bisweilen unerwünscht ist, da es eine ganze Anlage ins Dunkel setzen würde, daß ferner an den weitaus häufigsten Maschinen (Nebenschluß-Maschinen) bei einem Kurzschluß die EMK stark zurückgeht, und daß schließlich die Gefahr eines Kurzschlusses innerhalb der Maschine, wobei eine Sicherung im Außenkreise nichts nützt, näher liegt, als die Gefahr einer direkten Verbindung zwischen den Maschinenkabeln (vgl. § 81 B).

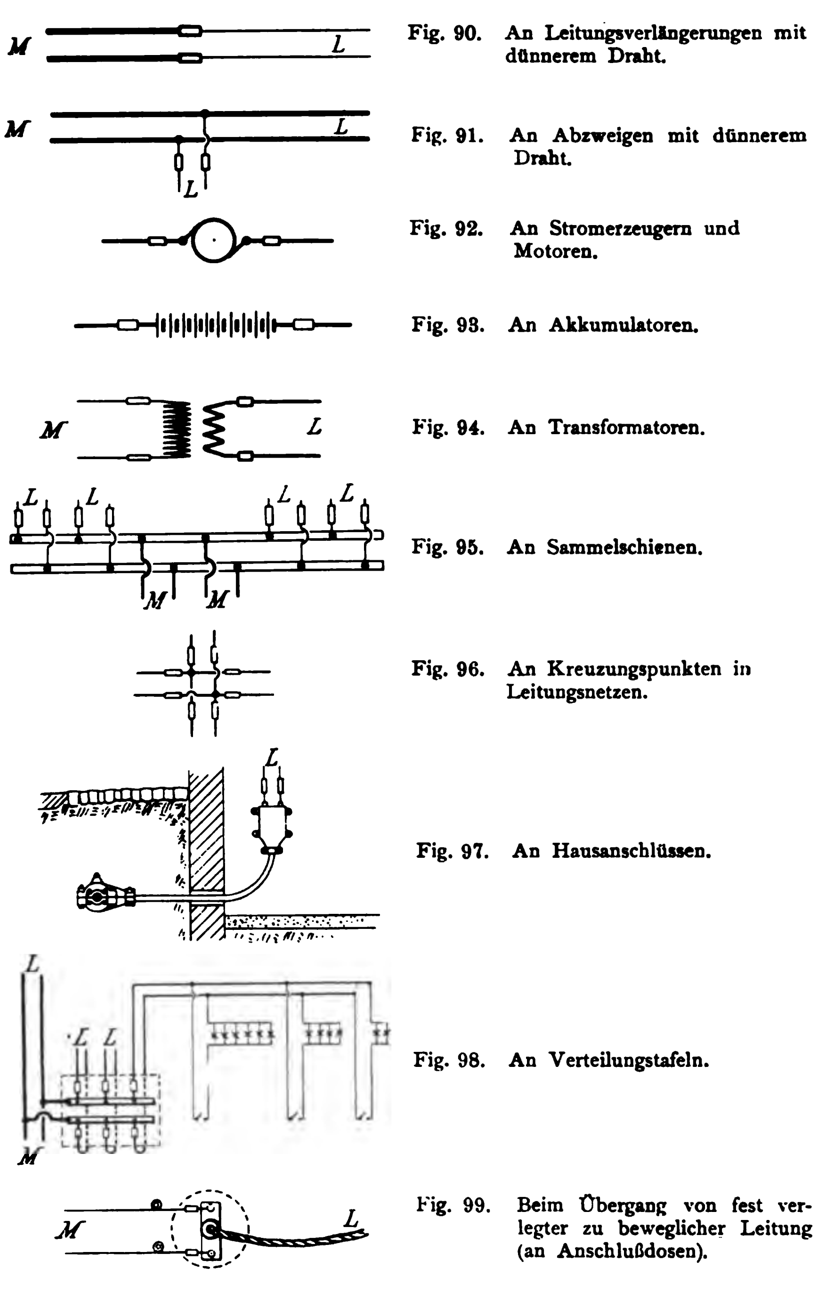


Fig. 90. An Leitungsverlängerungen mit dünnerem Draht.

Fig. 91. An Abzweigen mit dünnerem Draht.

Fig. 92. An Stromerzeugern und Motoren.

Fig. 93. An Akkumulatoren.

Fig. 94. An Transformatoren.

Fig. 95. An Sammelschienen.

Fig. 96. An Kreuzungspunkten in Leitungsnetzen.

Fig. 97. An Hausanschlüssen.

Fig. 98. An Verteilungstafeln.

Fig. 99. Beim Übergang von fest verlegter zu beweglicher Leitung (an Anschlußdosen).

M = Seite nach der Maschine hin. L = Seite nach den Lampen hin.

3. Hinter den Sammelschienen.

Die Teile einer Anlage, zu denen die vorhandenen Stromquellen führen, und von denen die Verbrauchsleitungen ausgehen, gestaltet man meistens zu hinter der Schalttafel liegenden Kupferschienen, den Sammelschienen, aus. Wo die Verteilungsströme die Sammelschienen verlassen, wird gesichert*, wie es Fig. 95 andeutet.

4. An den Kreuzungsstellen in Leitungsnetzen.

In Leitungsnetzen ist man nur dann sicher, daß die Drähte vor Überlastung geschützt sind, wenn man an allen Kreuzungsstellen zweipolig sichert. In Wirklichkeit läßt sich das nicht gut ausführen, man sichert aber stets an solchen Kreuzungspunkten, an denen die Speiseleitungen angreifen, und an besonders ausgewählten Stellen, wo es vorteilhaft erscheint (vgl. Fig. 96).

5. An Hausanschlüssen.

Da, wo eine vom Leitungsnetz abzweigende Leitung in ein Haus eintritt, wird gesichert auch ohne Querschnittsänderung (vgl. Fig. 97).

6. An Verteilungstafeln.

An dem Leitungssystem innerhalb der Häuser ist es unzweckmäßig, nach Punkt Nr. 1 dieses Absatzes allein je nach Bedürfnis vorzugehen, da sich Sicherungen im ganzen Hause zerstreut vorfinden und im Falle eines erforderlichen Nachsehens oder Neueinsetzens nur mit viel Zeitaufwand und umständlichen Mitteln (Leitern usw.) aufsuchen lassen würden.

Man zentralisiert daher die Sicherungen und versteht darunter folgendes: eine durchgehende, am Hausanschluß gesicherte starke Leitung (Steigleitung) führt zu mehreren in Reichhöhe angebrachten Verteilungstafeln (etwa für jedes Stockwerk eine), die mit Schienen ausgerüstet und nach dem Schema der Fig. 98 angeordnet sind.

Von hier aus gehen eine Anzahl von Stromverbraucher-Kreisen (Glühlampen, Bogenlampen, event. auch Motoren), deren Leitungen allgemein nach ihrem Querschnitt gesichert sein könnten. Für die Glühlampenleitungen aber gilt dabei der Satz, daß ihre Sicherungen nicht über 6 Ampere-Sicherungen sein sollen. Das würde also heißen, daß etwa 12 normale Lampen** in der Nähe von 100 Volt eine gemeinsame Sicherung haben können. In Fig. 98 ist der Gedanke für den 3. Kreis ausgeführt. Da nun der dünnste Draht, der verwendet werden darf (1 qmm), bis zu 6 Ampere Normalstrom führen kann und auch durch eine Stromsteigerung beim Durchgehen einer 6-Ampere-Sicherung noch nicht gefährdet ist, braucht hinter diesen 6-Ampere-Sicherungen der Verteilungstafel für fest verlegte Leitungen keine weitere Sicherung zu folgen, auch wenn man von einem dickeren Draht aus, der wegen des geringeren Spannungsverlustes verwendet wurde, zu

* Sichert man eine stromerzeugende Maschine nicht, so sind diese Sicherungen die ersten hinter der Maschine.

** Vgl. § 46.

dünneren Querschnitten übergeht. An der Verteilungstafel wird angegeben, zu welchen Räumen die Sicherungen gehören.

Sämtliche Leitungsanschlüsse an Verteilungstafeln müssen von vorn gelöst werden können. Zu dem Zweck wird die Marmortafel bis zu dem dahinterliegenden Schraubenkopf durchbohrt, oder man setzt die Klemme auf die Vorderseite und schützt sie mit einer isolierenden Kappe.

7. Beim Übergang von fest verlegter zu beweglicher Leitung.

Bewegliche Leitung, die stets aus verdrillten Gummiader-Schnüren besteht, ist durch Zufälligkeiten mehr gefährdet als festverlegte; daher sichert man an der Übergangsstelle im fest verlegten Teile, und zwar gewöhnlich mit weniger als 6 Ampere, damit bei einem Fehler im beweglichen Teil mit Sicherheit nicht der Streifen an der Verteilungstafel abtrennt. Zusammen mit der früher erwähnten Vorschrift, daß bewegliche Leitungen abnehmbar sein sollen, ergibt sich ein Installations-Element (vgl. Fig. 75), die Anschlußdose mit Steckkontakt und zweipoliger Sicherung, die Fig. 99 schematisch darstellt.

Man hat in diesem Fall zu sichern, auch wenn keine Querschnittsverringerung hinter der Anschlußdose vorliegt. Bei Pendelschnur von 0,75 qmm wird in der Anschlußdose (Deckenrosette) höchstens mit 4 Ampere gesichert.

Nach der Verwendungsart der Sicherungen richten sich ihre Ausführungsformen.

A. Gewöhnliche Streifensicherungen.

Fig. 100 zeigt eine ältere Streifensicherung der Siemens-Schuckertwerke. Das Fundament besteht aus Steingut; seine Begrenzungsflächen zu den Seiten geben einem in der Abbildung weggenommenen Zink-

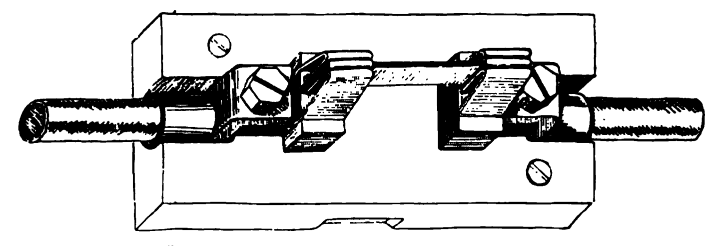


Fig. 100. Ältere Streifensicherung der Siemens-Schuckertwerke.

blechschutzkasten mit Preßspan- und Asbestausfütterung Führung und Halt. Die mit Kabelschuhen versehenen Anschlußstellen enthalten die im § 41 bereits erwähnten Federkontakte, zwischen denen der mit Preßspan versteifte und mit angelöteten Kupferenden* versehene Bleistreifen eingeschoben wird. Neuere Sicherungen dieser Art verwenden Silberdrähte als Abschmelzstreifen.

* Entsprechend der Verbandsvorschrift, daß weiche, plastische Metalle in Kontaktstücke aus Kupfer oder gleich geeignetem Metall eingelötet sein müssen.

Streifensicherungen ähnlicher Art werden nur in Betriebsräumen und nur unter Behandlung durch unterwiesenes Personal verwendet.

B. Die Patronensicherung der Siemens-Schuckertwerke.

Figg. 101 u. 102 stellen Patronensicherungen der Siemens-Schuckertwerke dar. Fig. 101 ist das Modell für Verteilungstafeln, Fig. 102 für Einzelsicherungen. Patronensicherungen finden Verwendung in der Hausinstallation. Sie sind aus dem Bedürfnis hervorgegangen, ein Material zu schaffen, das alle Gefährdung, auch des ununterwiesenen Personales, ausschließt: Der Schmelzstreifen soll in einem vollständig verschlossenen Raume sitzen, so daß in keinem Falle irgendwelche Feuererscheinung beim Durchgehen nach außen gelangt. Die Patrone, ein Porzellanteil im wesentlichen zylindrischer Form, trägt an beiden Stirnseiten Messingscheiben, als Kontakte für den Schmelzstreifen und als Abschlüsse des Hohlraumes, in dem der Schmelzstreifen liegt. Das Porzellanfundament enthält unten einen Messingring, der mit dem einen, und einen Messingstift, der mit dem anderen Leitungsende verbunden ist. Beim Aufsetzen der Patrone ist sie bereits an den einen Leitungsdraht gelegt. Den anderen Leitungsdraht schließt man erst dadurch an, daß die obere, mit Porzellan verkleidete, als Messingscheibe ausgebildete Mutter aufgeschraubt wird. Durch diese Anord-

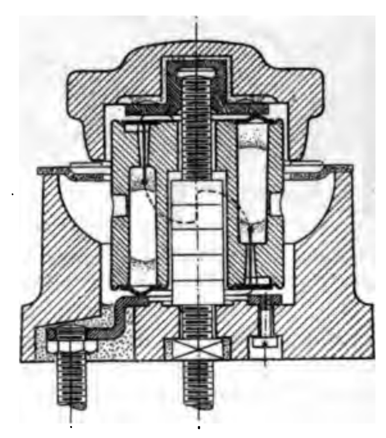


Fig. 101. Patronensicherung. (Element für Verteilungstafeln).



Fig. 102. Patronensicherung (Einzelelement).

nung ist ein guter Schutz der Hand für den Fall geschaffen, daß eine Sicherung beim Einsetzen auch mit heftiger Feuererscheinung durchbrennt. Weiterhin ist für diese Sicherungen das vom Verband als Forderung aufgestellte Bedürfnis maßgebend gewesen, daß Sicherungen von 6 bis 30 Ampere in dem Sinne unverwechselbar sein sollen, daß fahrlässige oder irrtümliche Verwendung von Einsätzen für zu hohe

Stromstärken ausgeschlossen ist. Bei der vorliegenden Ausführungsform wird das erreicht, indem die mittlere Bohrung der Patrone für die verschiedenen Ströme verschieden tief mit einer größeren lichten Weite ausgeführt wird. Die weite Bohrung geht für die Patrone der geringsten Stromstärke ganz durch. Auf dem Stift werden Stellmuttern aus Isoliermaterial bis zu der Höhe aufgereiht, daß die Patrone gerade unten aufsitzt. Eine Patrone für höhere Stromstärke erreicht dann den unteren Ring nicht. Schließlich ist dafür Sorge getragen, daß von außen erkannt werden soll, ob eine Patrone durchgebrannt ist oder nicht. Es wird zu dem Zweck ein sehr dünner Metallstreifen dem eigentlichen Schmelzstreifen parallel geschaltet, aber so, daß er in einer kleinen Nische an dem Umfang sichtbar ist. Diese Hilfsstreifen gehen mit den Hauptstreifen sicher durch, bringen aber nur eine verschwindend kleine Lichterscheinung nach außen. Schutzteile aus geeignetem Material decken überdies die Nischen bei der zusammengesetzten Sicherung so zu, daß man die Hand nicht verletzen kann.

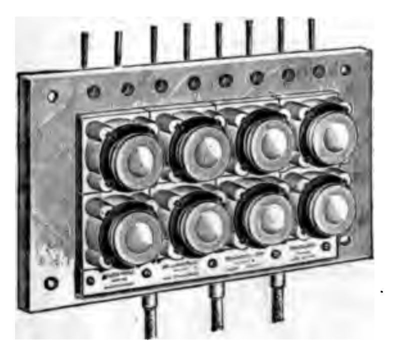


Fig. 103. Verteilungstafel, zusammengesetzt aus Elementen der Figur 101.

Das vorliegende Material eignet sich gut zum Zusammensetzen der bereits erwähnten Verteilungstafeln, für die Fig. 103 ein Beispiel gibt.

C. Die Stöpselsicherung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die Installationssicherung der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft besteht nur aus Porzellan- und Metallteilen. Die Konstruktion ist aus den Figuren 104 und 105 zu ersehen. Fig. 104 zeigt einen Stöpsel,

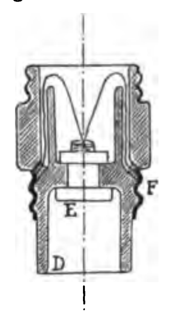


Fig. 104. Schmelzeinsatz.

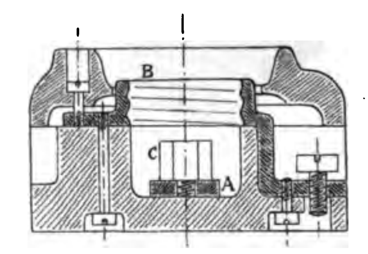


Fig. 105. Sicherungselement.

Fig. 105 das Gehäuse im Schnitt. Die Metallschiene A ist mit dem einen, der Gewindeteil B mit dem anderen Ende des Leitungsdrahtes verbunden. Auf A befindet sich eine Kontaktschraube C, deren Kopf

je nach der Stärke der Sicherung verschieden hoch sein kann. Bei dem Hineinschrauben einer zu starken Sicherung sitzt der Stöpselfuß *D* (Fig. 104) eher auf der Schiene *A* auf, als die Schraube *C* den Kontaktknopf *E* berührt. Von dem letztgenannten Knopf führt der Abschmelzdraht, der in einem Winkelzug um eine Scheidewand aus Porzellan herumgeht, zu dem Metallgewinde *F* an der Außenseite des Stöpsels. Dieses Gewinde ist bei der eingeschraubten Sicherung mit dem Gewindeteil *B* (Fig. 105) in Verbindung.




Fig. 106.

Das Äußere einer ähnlichen Konstruktion ist durch Fig. 106 gegeben. Hier ist an dem äußeren Metallgewinde des Stöpsels ein Ring angelötet, der sich bei dem Einschrauben einer zu starken Sicherung auf den entsprechenden Gewindeteil des Gehäuses aufsetzt, ehe der Kontaktknopf den Anschluß erreicht hat.

Auch diese Sicherungselemente lassen sich zu Verteilungstafeln zusammensetzen.

D. Freileitungssicherungen.

An Freileitungen sichert man entweder an den Glocken oder im gespannten Draht. Bei dem ersteren Verfahren isoliert die Glocke den ankommenden und den weiterführenden Draht voneinander, während durch Einbringen des Schmelzeinsatzes die Verbindung hergestellt wird.

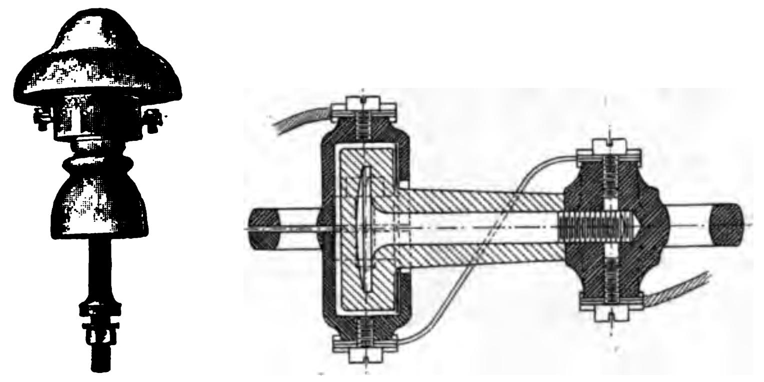


Fig. 107. Freileitungssicherung (Siemens-Schuckertwerke).

Fig. 108. Fliegende Sicherung.

Die Ansicht einer solchen Sicherung zeigt Fig. 107, und zwar in Ausführungsform der Siemens-Schuckertwerke. Der Schmelzeinsatz, derselben Form wie bei Fig. 101, befindet sich im Kopf des Isolators und ist durch eine schirmförmig erweiterte Kappe gegen Regen geschützt. Das zweite Verfahren, im gespannten Draht zu sichern, setzt

voraus, daß ein „fliegender" Isolierkörper vorhanden ist, der den Zug der Leitung aufnimmt. Da auf Zug genügend beanspruchbare Isoliermaterialien nicht vorkommen, greift man zu dem Ausweg das Isoliermaterial auf Druck zu beanspruchen, wofür Fig. 108 ein Beispiel gibt. Ein mit Isoliermaterial umpreßter Metallbolzen trägt an dem einen Ende einen Kopf von großem Durchmesser, an dem anderen ein Gewinde. Eine Kappe aus Bronze greift um den Kopf herum derart, daß die Öffnung der Kappe kleiner ist, als der Kopf des Bolzens. Die Leitung greift mittels angegossener Augen einerseits an der Kappe, anderseits an einem auf das Gewinde aufgeschraubten Metallteil an und beansprucht einen ringförmigen Teil der isolierenden Umpressung (Hartgummi, Ambroin) auf Druck. Der Schmelzstreifen wird im Bogen um den Bolzen geführt; an die Leitungen gelötete Kupferseile führen den Strom um die weniger zuverlässigen Kontaktstellen zwischen Drahtösen und Gußaugen herum.

E. Röhrensicherungen.

Mit gewöhnlichen Schmelzstreifen zu arbeiten ist schwer möglich wenn es sich um höhere Spannungen, etwa von 500 Volt ab handelt, denn die Lichtbogen werden sehr lang. Einen Ausweg lassen hier die Röhrensicherungen offen, bei denen der meistens aus Silber bestehende Schmelzdraht in ganzer Länge in ein beiderseits offenes Asbestrohr gebracht wird. Der Schmelzstreifen brennt regelmäßig im Rohr durch, da hier die Wärmeabfuhr seitens der Kontakte am geringsten ist. Ein Lichtbogen innerhalb des Asbestrohres ruft aber eine starke Explosion hervor, indem die entstehenden heißen Gase heftig zu beiden Seiten als Feuergarben herausgeschleudert werden. Nach der Explosion dringt sofort abgekühlte, also nicht mehr stromleitende Luft in das Rohr ein. Diese Schußröhrensicherungen können bis zu hohen Spannungen, etwa 10000 Volt verwendet werden, beanspruchen aber bei diesen Spannungen in Verlängerung der Röhrenachse beiderseits einen ausgedehnten Raum, in dem keine Metallteile liegen dürfen.



Fig. 109. Zweipolige Hochspannungs-Röhrensicherung.

An etwaigen Metallteilen im Lichtbogengebiet klettert der Lichtbogen weiter. Außerdem würden hindernde Gegenstände im Lichtbogengebiet

bei diesen Sicherungen in geringer Entfernung geschmolzen oder durchschossen werden.

Fig. 109 stellt eine zweipolige Röhrensicherung für 5000 Volt dar, wobei die eine Patrone herausgenommen ist. Die Federkontakte sitzen auf Isolierglocken. Die Patrone besteht äußerlich aus Porzellan mit Manschetten an beiden Enden zur Vergrößerung des Kriechweges. Der Hohlraum des Porzellankörpers ist mit Rotgußkappen verschlossen, an denen seitlich die Kontaktmesser sitzen. Die Asbestrohre sind durch die Kappen durchgeführt; der Silberdraht biegt beim Verlassen der Rohre um und ist an den Kappen angeschraubt. Man bringt die Patrone in schräge Lage, die sich als die günstigste herausgestellt hat. Die Asbestrohre vertragen eine große Anzahl von Kurzschlüssen, ehe sie ausgewechselt zu werden brauchen. Die Patrone bleibt bei allen vorkommenden Kurzschlüssen erhalten. Sie wird mit besonders dazu konstruierten hölzernen Zangen eingesetzt und herausgezogen.

F. Ölsicherungen.

Man sucht die Vorteile der Unterbrechung unter Öl* auszunutzen, indem man einen mechanisch gespannten Schmelzstreifen teilweise unter Öl setzt. Brennt der Streifen oberhalb des Öles durch, so wird der im Öl verbleibende Teil durch Federkraft schnell heruntergezogen, wodurch der Lichtbogen erstickt. Gegenüber dem Ölschalter besteht hier noch mehr die Schwierigkeit, daß die Bahn des Lichtbogens leitende Teilchen, die vom zerstäubten Schmelzstreifen herrühren, zurückläßt, und daß die Löschung nicht ganz unter Öl erfolgen kann. Ölsicherungen fallen daher weniger einfach aus, als zu erwarten wäre. Sie sind, wie Ölschalter, da mit Vorsicht zu verwenden, wo Spulen im abzuschaltenden Kreise die Isolation der Anlage bei der Unterbrechung gefährden können.

§ 43. Überspannungssicherungen.

A. Blitzschutzvorrichtungen.

Gelangt atmosphärische Elektrizität an elektrische Leitungen, so würden ohne weiteren Schutz dadurch Betriebsstörungen entstehen. Es würden zwischen verschiedenen Stellen eines Leitungssystemes, das nur niedrige Spannungen führen darf, durch die zusätzlichen von der Atmosphäre herrührenden Elektrizitätsmengen unzulässig hohe Spannungen auftreten. Die hohe Spannung sucht sich den bequemsten Weg zum Ausgleich, meistens über die Oberfläche von Isoliermaterialien oder durch Luftstrecken, und zwar immer da, wo die spannungführenden Teile sich am nächsten kommen. Gewöhnlich handelt es sich um einen Weg von Freileitungen zur Erde hin. Der Ausgleich kann entweder leichter Art sein; er gleicht dann einem Funken einer Elektrisiermaschine; solche leichte Entladungen entstehen hauptsächlich, wenn Gewitter in der Nähe sind, durch Störung des elektrischen Ruhe-

* Vgl. Ölausschalter § 41 D.

zustandes in der Atmosphäre (durch elektrische Wellen); oder der Ausgleich kann heftiger Art sein, wenn ein Blitz in die Leitung schlägt: letzterer Fall ist seltener. In beiden Fällen handelt es sich um einen kurzdauernden Ausgleich, der bei leichten Funken nicht schaden würde, wenn keine Betriebsspannung vorhanden wäre. Der Ausgleichsfunken zieht aber bei elektrischen Anlagen einen von der Betriebsspannung herrührenden Lichtbogen nach sich, der stehen bleibt, wenn die stromführenden Teile nahe genug beieinanderliegen. Der Lichtbogen wird in vielen Fällen einen Kurzschluß zwischen den beiden Leitungen bzw. zwischen einer Leitung und Erde bilden und zwar normalerweise an den Stellen, wo die betroffene Freileitung in Gebäude eintritt oder an den Schaltanlagen und Motoren in diesen Gebäuden.

Atmosphärische Elektrizitätsmengen treten plötzlich auf und verschwinden plötzlich, oder die Entladung hat oszillatorischen Charakter, d. h. der scheinbare einmalige Ausgleichsfunke ist aus einer sehr großen Anzahl von hin- und hergehenden Entladungen zusammengesetzt. Es handelt sich dabei um Schwingungen bis zu mehreren Millionen Wechseln in der Sekunde.

Sowohl plötzlich auftretende, als auch schnell schwingende Elektrizitätsmengen haben aus Gründen, die erst in der Wechselstromlehre* erklärt werden können, die Eigentümlichkeit, eine kurze Luftstrecke gegenüber einem längeren und noch mehr gegenüber einem gewundenen Draht beim Ausgleich zu bevorzugen. Bei diesem Punkte greift man zur Abhilfe der Betriebsstörungen an.

Fig. 110 bedeute einen Draht, der sich von einer Stelle A als Freileitung zu der Stelle B erstreckt. Zu A und B soll die atmosphärische Elektrizität nicht gelangen. Vor die Eintrittsstellen in die Gebäude schaltet man je eine Drosselspule, die in diesem Fall aus etwa 10 Windungen von 10 cm Durchmesser mit Luftisolation besteht.

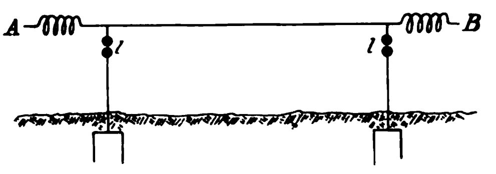


Fig. 110. Blitzschutzschema.

Vor diesen Windungen (von der Leitungsstrecke aus gerechnet) zweigt auf jeder Seite ein Draht von der Leitung ab zu der kurzen Luftstrecke l, die durch zwei voneinander isolierte, in geringem gegenseitigen Abstand stehende Metallteile gebildet wird. Der zweite Metallteil ist auf dem kürzesten Wege gut geerdet. Die Luftstrecke beträgt bei niedrigsten Spannungen und bis 600 Volt etwa 5 mm, bei 5000 Volt etwa 10 mm; an den Draht gelangende atmosphärische Elektrizität strömt nun mit Durchschlagung der Luftstrecke zur Erde ab und es bleibt noch übrig, den durch sie mitgezogenen Lichtbogen an der Funkenstrecke zu löschen. Das Entstehen des Lichtbogens ist ohne weiteres klar, wenn,

* Vgl. Selbstinduktion bei Wechselstrom § 116 A.

wie bei Straßenbahnen, der eine Pol der Maschine an der Leitung, der andere an Erde liegt. Bei zweipoligen Leitungen werden beide Stränge in der gleichen Weise geschützt und es treten auch gewöhnlich in beiden Strängen die schädlichen Überspannungen auf. So wird durch die Funkenstrecke der eine und der andere Pol zugleich geerdet, wodurch nun auch der Lichtbogen auftritt. Zur Löschung des Lichtbogens gibt es mehrere Mittel: Bei Wechselstrom, und zwar bis 500 Volt, verwendet man die Rollenblitzschutzvorrichtungen, für die Fig. 111 ein Beispiel darstellt. Die Luftstrecke besteht aus einer Anzahl (hier zwei) einzelner Lufstrecken, die durch nahe beieinander stehende drehbare Rollen aus geeignetem Metall gebildet werden. In dem angegebenen Beispiel kommen sich die Bronzerollen von etwa 25 mm Durchmesser auf 2 mm nahe, so daß die Luftstrecke 4 mm beträgt. Die Wirkungsweise der Lichtbogenlöschung erklärt sich nach dem bei den Ausschaltern Gesagten durch die Kühlwirkung der den Lichtbogen unterteilenden Metallmassen.



Fig. 111. Rollenblitzschutzvorrichtung.



Fig. 112. Blitzschutz-Hörnerpaar (Siemens-Schuckertwerke).

Das zweite und wichtigere Mittel zur Lichtbogenlöschung beruht auf der Verwendung der dynamischen Stromwirkung:

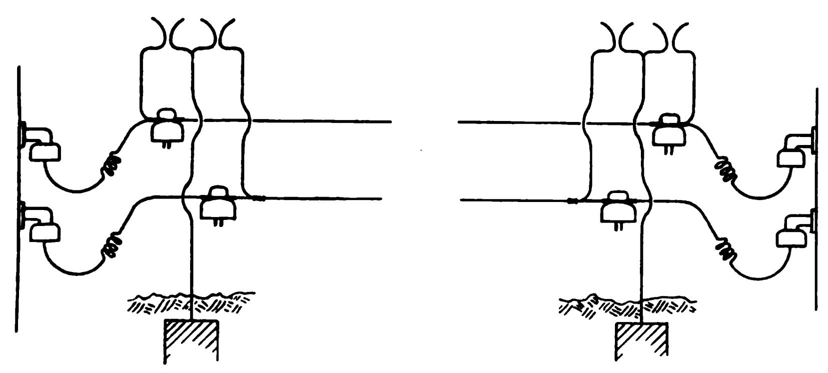


Fig. 113. Schema für den Blitzschutz einer Doppelleitung.

Den einander genäherten Metallteilen gibt man die bei den Ausschaltern bereits erwähnte Hörnerform, wobei zu beachten ist, daß die kürzeste Entfernung zwischen den Hörnern, wo auch der Funken überspringt, höher liegt als die horizontalen Strecken, damit von vornherein

für den nachstürzenden Strom die Schleife eingeleitet ist. Das Wesentliche für die Erklärung der Löschung ist durch das in § 41, C Gesagte erledigt.

Fig. 112 zeigt eine Abbildung eines Hörnerpaares in Ausführung der Siemens-Schuckertwerke, während Fig. 113 das Schema für die Blitzschutzsicherung einer zweipoligen Freileitung mit Hörnerschutzvorrichtungen zu beiden Seiten darstellt.

B. Spannungssicherungen.

Spannungssicherungen schützen Niederspannungsanlagen, vornehmlich Wechselstromanlagen, die von Transformatoren aus gespeist werden, vor dem Auftreten von höheren Spannungen gegen Erde zur Vermeidnng von Lebensgefahr. Zwei Metallscheiben sind durch eine dünne, mit Löchern versehene Glimmerplatte gegeneinander isoliert. Die eine dieser Metallplatten wird mit einer Erdleitung, die andere mit der zu schützenden Leitung verbunden. Wird nun die Spannung der zu schützenden Leitung gegen Erde zu hoch, so durchschlägt die Elekrizität die kurze Luftstrecke in Dicke der Glimmerscheibe und bildet zwischen den beiden Metallplatten Perlen, wodurch der Niederspannungsteil geerdet und gefahrlos gemacht wird. Die Einrichtung wirkt, auch wenn kein anderer Teil der Anlage geerdet ist, nur durch Kapazitätswirkung der Hochspannungsleitung, indem die Leitung den einen, die Erde den anderen Belag, und die Luft (oder die Kabelisolation) das Dielektrikum des Kondensators bildet; die bei höheren Wechselspannungen lebhaft auftretenden Lade- und Entladeströme des Systemes genügen zur Perlenbildung und sicheren Erdung.



Fig. 114. Spannungssicherung (Siemens-Schuckertwerke).

Die hier gekennzeichneten Spannungssicherungen werden von den Siemens-Schuckertwerken, und zwar für Niederspannungsanlagen bis 250 Volt hergestellt derart, daß sie etwa bei 400 Volt durchschlagen. Die Glimmerscheibe samt den beiden Metallplatten ist in einem Kontaktstöpsel untergebracht. Durch Einschrauben des Stöpsels in ein geerdetes Edisongewinde wird die erforderliche Schaltung hergestellt, wobei die zu schützende Leitung an den Metallknopf gelegt ist, auf dem der Stöpsel aufsitzt. Fig. 114 zeigt das äußere einer dieser Sicherungen. Falls Tropfwasser in der Nähe dieser Sicherung zu befürchten ist, werden besonders dazu hergestellte Schutzkappen verwendet.

§ 44. Selbstschalter (Automaten).

Die Aufgabe der Selbstschalter ist bereits in § 22, 5 angegeben. Sie haben unter Anwendung elektromagnetischer Wirkungen zu unterbrechen, wenn bestimmte Stromverhältnisse eintreten. Bei zu starkem Strom unterbrechen die Maximal-Automaten, bei zu schwachen Strom

die Minimalautomaten. Sie sind mit Kontakten nach Art der Ausschalter ausgerüstet, zwischen denen sich ein stromleitendes Schlußstück befindet, welches nach Auslösung durch den Magneten aus den Kontakten herausgerissen wird. Maximalautomaten haben dieselbe Aufgabe zu erfüllen wie Schmelzsicherungen, sie wirken hingegen bei geeigneter Konstruktion schneller als die letzteren und können sehr genau eingestellt werden, so daß eine geringe Stromsteigerung über einen gewissen Wert zum schnellen Ausschalten führt.

Sie haben außerdem den Vorteil vor den Schmelzsicherungen, daß eine Ausschaltung nicht jedesmal durch Anschaffen eines neuen Schmelzstreifens Kosten verursacht, dagegen ist der Preis der Automaten höher als der Schmelzsicherungen für Unterbrechung bei gleichen Stromverhältnissen.

Über die Geschwindigkeit des Ausschaltens in einem mittleren Fall gibt zunächst eine Rechnung Aufschluß.

Beispiel. Es liege ein Minimalautomat vor, bei dem der Anker des Magneten unmittelbar an dem Messer sitzt; die Schaltbewegung sei geradlinig; die Federkraft sei zur Vereinfachung der Rechnung konstant angenommen, und zwar ziehe sie mit 2 kg das Messer aus den Kontakten heraus, falls es vom Magneten freigegeben wird. Die magnetische Kraft muß demnach auch 2 kg als Geringstwert betragen. Das Messer selbst wiege mit seinem Anker und seinen Führungsteilen 200 g; nach welcher Zeit vom plötzlichen Aufhören des Magnetismus ab gerechnet schaltet der Automat aus, falls bei 3 cm Bewegung des Messers die Unterbrechung erfolgt sein soll?

Die Berechnung wird vorgenommen nach dem Ausdruck (gleichmäßig beschleunigte Bewegung):

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2,$$

dabei bedeutet: s = Weg des Messers (m),
a = Beschleunigung (m/Sek.²),
t = Zeit vom Beginn der Bewegung ab (Sek.).

Die treibende Kraft der Feder ist der zehnfache Wert der Schwerkraft, da die Feder mit 2 kg ziehen soll, während das Gewicht der bewegten Teile 0,2 kg beträgt. Nach dem Satz: „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung" folgt, daß a in diesem Beispiel den 10fachen Wert der Erdbeschleunigung haben muß:

$$a = 98{,}1 \ \text{m/Sek.}^2;$$

für t folgt:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}03}{98{,}1}} = \sqrt{0{,}000612} = 0{,}02475 \ \text{Sek.} = \sim \frac{1}{40} \ \text{Sek.}$$

Obige Rechnung hat den Zweck, einen Vergleich mit der Ausschaltgeschwindigkeit bei Schmelzsicherungen zu geben. Sie kann für einen 30-Ampereautomaten angenähert gültig sein, soweit die Rechnung

nicht durch besondere Voraussetzungen verwickelter wird. So z. B. sind bei Maximalautomaten stets zwei Teile zu beschleunigen, zuerst der Anker und dann das Messer, wodurch die Zeit der Schaltbewegung etwas vergrößert wird. Immerhin ist aber der Unterschied der Ausschaltgeschwindigkeit zugunsten der Automaten gegen die Schmelzsicherungen erkennbar, auch wenn nicht die Verhältnisse dieses Beispieles ganz erfüllt sind. Die Sicherung im Beispiel des § 42 schaltete bei einem heftigen Kurzschluß erst nach rund $^1/_4$ Sekunde aus, während hier etwa nur $^1/_{10}$ dieser Zeit in Frage kommt.

Man entscheidet sich für die Verwendung der Maximalautomaten gegen die Schmelzsicherungen je nach der zu erwartenden Häufigkeit der Kurzschlüsse bzw. unzulässiger Überlastungen. Allgemein üblich sind Maximalautomaten bei Straßenbahnzentralen in den Speiseleitungen zu den einzelnen Strecken. Bisweilen werden sie verwendet bei solchen Motoren, wo eine Ausschaltung in der Überlastung angängig ist, z. B. bei einzelnen Werkzeugmaschinenantrieben.*

Für die Automaten gelten nur die für Ausschalter und Apparate gegebenen Verbandsvorschriften. Letztere beziehen sich hauptsächlich auf die Wahl des Isoliermateriales, auf die zulässige Kontaktwärme und die Fernhaltung der Feuererscheinungen von brennbaren Gegenständen.

Automaten baut man meistens für einpolige Ausschaltung, sie kommen jedoch auch zweipolig und für Drehstrom auch dreipolig vor.

Die Technik strebt darnach, neben den Anforderungen der Sicherheit und Zweckmäßigkeit der Stromunterbrechung noch folgende Aufgaben der Automaten zu erfüllen:

1. Die Ausschaltung soll möglichst schnell nach dem Eintritt der nicht gewünschten Stromverhältnisse erfolgen.
2. Die Ausschaltstromstärken der Automaten sollen möglichst scharf regelbar sein.
3. Die Automaten sollen während der Einschaltbewegung unbekümmert darum, ob der Arbeiter losläßt oder nicht, ausschalten, wenn von vornherein die nicht gewünschten Stromverhältnisse vorhanden sind.
4. Je mehr die Stromverhältnisse sich von den gewünschten Grenzen entfernen, um so größer soll die zur Ausschaltung führende Kraftwirkung werden (magnetische Zwangläufigkeit).

Die Anforderung 1 setzt voraus, daß der Automat in allen bewegten Teilen mit großen Kräften und geringen Massen arbeitet. Da bei großen Kräften auch die Reibungskräfte an den Sperrklinken usw. größer werden und da die Reibung sehr von den jeweiligen Oberflächen- und Ölverhältnissen abhängt, bedarf es besonderer Vorrichtungen, die

* Betreffend Verwendung von Minimalautomaten vgl. die später folgenden Gebiete: Akkumulatoren (§ 107), Bogenlampen in Reihe (§ 54 C), automatische Minimalabschaltung von Nebenschlußmotoren (§ 93 B).

Grenze der zulässigen Stromstärke scharf einstellbar zu erhalten. Automaten nach den früher gegebenen schematischen Darstellungen Figg. 19 und 20 ausgeführt, würden in Beziehung auf diesen Punkt sehr mangelhaft sein.

Der übliche Grundgedanke ist der, durch die Einschaltbewegung Arbeit aufzuspeichern, etwa durch Heben eines Gewichtes oder durch Spannen einer Feder, die eine Masse beschleunigen kann. Durch geschickte Anordnung ist es möglich, die gespannten Teile so festzuhalten, daß sie wenig auf ihre Feststellvorrichtung drücken, daß sich aber die bewegenden Kräfte schnell vergrößern, wenn der gespannte Teil seine Ruhelage verlassen hat. Zum Einleiten der Ausschaltbewegung braucht dann das System nur ausgelöst zu werden, damit sich genügende lebendige Arbeit ansammelt, durch einen Stoß die vorhandenen Reibungskräfte (etwa die Kontaktreibung) zu überwinden. Durch Wahl geschickter Übersetzungen unter mehrmaliger Anwendung dieses Gedankens ist es möglich, mit den kleinsten Kräften die größten Bewegungen auszulösen.* Dem Anker des Elektromagneten gibt man in diesem Falle ein Stück reibungslosen toten Gang; dadurch sammelt er bereits lebendige Arbeit, die Feststellvorrichtung loszuschlagen. Bei Maximalautomaten liegen die Verhältnisse hierfür am günstigsten, denn, wie spätere Kapitel zeigen, wird bei Annäherung des Ankers zu den Polen die magnetische Kraft größer, und zwar ist sie angenähert umgekehrt proportional dem Quadrat des Polabstandes vom Anker. Bei Minimalautomaten wird der Anker, der stets unter dem Einfluß einer zurückziehenden Feder steht, losgelassen, wenn die magnetische Kraft des angezogenen Ankers geringer wird, als die Federkraft. Nach dem Augenblick des Loslassens vergrößert sich der Polabstand, die magnetische Kraft nimmt dadurch schnell ab, und der Anker ist imstande, aus der Arbeit der gespannten Feder beim Rückgang lebendige Arbeit in sich aufzuspeichern. Am Ende seines toten Ganges schlägt er daher ebenfalls die Sperrvorrichtung des gespannten Systems zwecks Ausschaltung zurück. Es ist vorteilhaft, wenn die Teile, die der Anker zurückschlägt, wenig Masse haben (leichte Stifte, kleine Nasen usw.), damit die im Anker aufgespeicherte lebendige Arbeit zu möglichst großem Teil für die Überwindung der Reibungsarbeit verwendet werden kann.

Eine schematische Veranschaulichung dieses Gedankens geben die Figg. 115 und 116, und zwar für einen Maximal- und für einen Minimalautomaten.

Bei Minimalautomaten ist der Fall denkbar, daß der Strom sehr schnell durch Null geht und sehr schnell in der entgegengesetzten Richtung ansteigt, so schnell, daß der Anker nicht Zeit hat, während dieses Vorganges loszulassen. Der Automat soll auch in diesem Falle ausschalten, das geschieht aber bei den gewöhnlichen Minimalautomaten

* Darauf beruhen auch mechanische und elektrische Ausrückvorrichtungen von Webstühlen, Druckereipressen usw., sowie elektrische Türöffner.

nicht, denn der Anker bleibt mit umgekehrtem Magnetismus angezogen. Auf diesen Fall bezieht sich hauptsächlich die Forderung 4 (magnetische Zwangläufigkeit), denn bei Maximalautomaten ist sie ohne weiteres erfüllt. So ist ein System von Automaten entstanden, das mit zwei Spulen arbeitet, die um denselben Eisenkern gewickelt sind. Die eine besteht gewöhnlich aus wenigen dicken Windungen und ist vom Strom der Anlage durchflossen, die andere gewöhnlich aus vielen dünnen Windungen von großem Widerstand, so daß sie wie ein Spannungsmesser geschaltet wird. Beide Spulen arbeiten mit ihrem Magnetismus einander entgegen. Ihre Windungen sind so bemessen, daß bei normalem Strom und normaler Spannung die magnetischen Wirkungen beider Spulen sich aufheben, also kein Magnetismus vorhanden ist. Entfernen sich die Stromverhältnisse von ihren normalen Werten, so stellt sich sofort der Magnetismus ein entsprechend der Differenz der Wirkungen beider Spulen; geht der Strom zurück, so wirken die Spannungswindungen und ziehen den Anker an, steigt der Strom über seinen normalen Wert, so überwiegen die Stromwindungen und ziehen den Anker ebenfalls an, ändert sich zugleich Spannung und Strom in entgegengesetztem Sinn, so wird dadurch die anziehende Kraftwirkung auf den Anker gegen die vorigen Fälle vergrößert.*

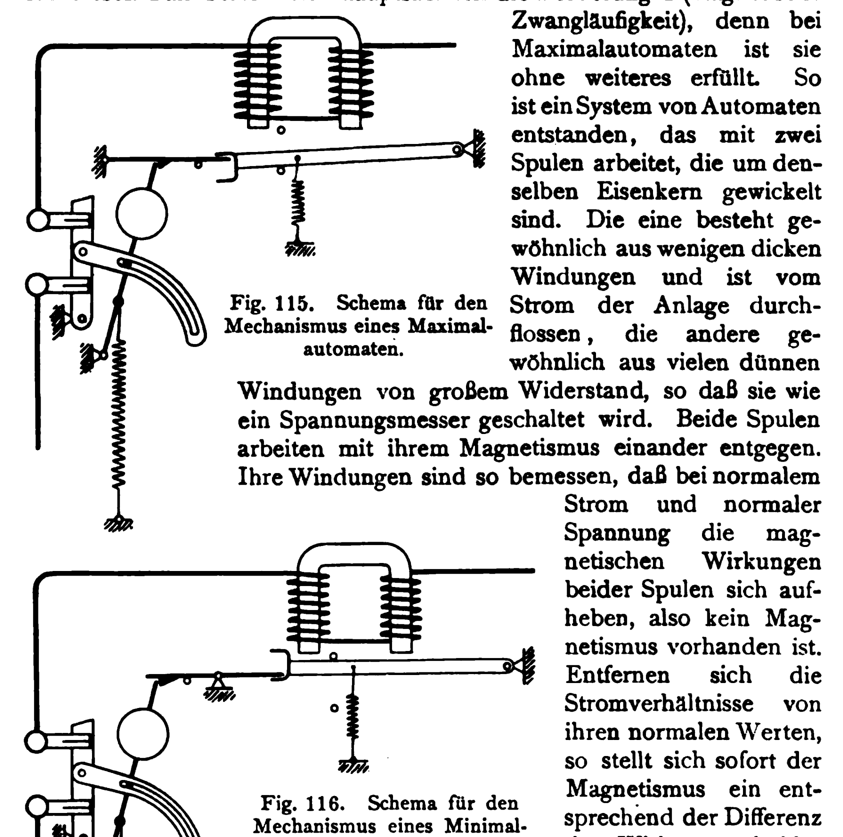


Fig. 115. Schema für den Mechanismus eines Maximalautomaten.

Fig. 116. Schema für den Mechanismus eines Minimalautomaten.

Dieser Gedanke auf selbsttätige Ausschalter angewendet führt zu einer Einrichtung, die zugleich Maximal- und Minimalautomat ist, aber

* Ändert sich Spannung und Strom in gleichem Sinn und in gleichem Maße, was in geringem Maße nicht schadet, in weiten Grenzen betriebsmäßig nicht vorkommt, so wirkt diese Einrichtung nicht.

stets mit Anziehung des Ankers, also magnetisch zwangläufig, arbeitet. Sie kennt den oben erwähnten Nachteil der gewöhnlichen Minimalautomaten nicht und wird daher mit Vorteil verwendet. Sie schaltet als Rückstromausschalter* nicht nur aus, so lange der Strom nahezu gleich Null ist, sondern erst recht, wenn er seine Richtung umkehrt und in der Umkehrung an Stärke zunimmt.

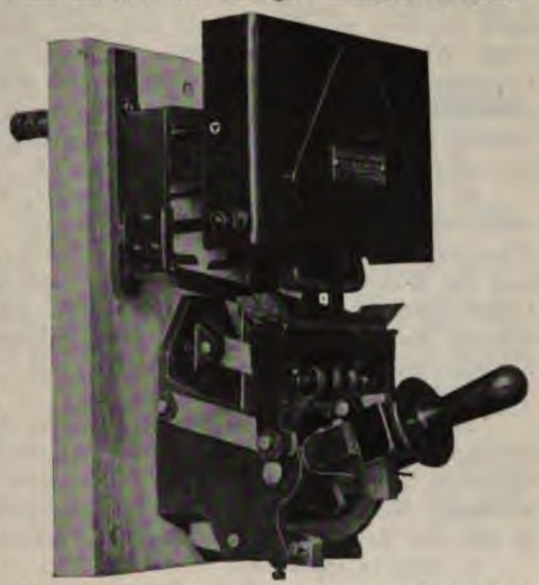


Fig. 117. Maximalautomat (Siemens-Schuckertwerke).

Einen Maximalautomaten mit Hörnernebenschluß zur Verwendung bis 650 Volt zeigt Fig. 117; er erfüllt durch Regelbarkeit des Abstandes zwischen Magnetpol und Anker scharfe Einstellbarkeit und durch besondere Klinkenanordnung auch die Anforderung Nr. 3 dieses Abschnittes. Der Minimalautomat Fig. 118 leitet ebenfalls mit freiem Gang des Ankers seine Bewegung ein. Zwei Messingschrauben am Anker lassen ebenfalls durch Einstellung auf verschiedenen Luftraum zwischen Pol und Anker genaue Einregulierung der Unterbrechungsstromstärke zu.

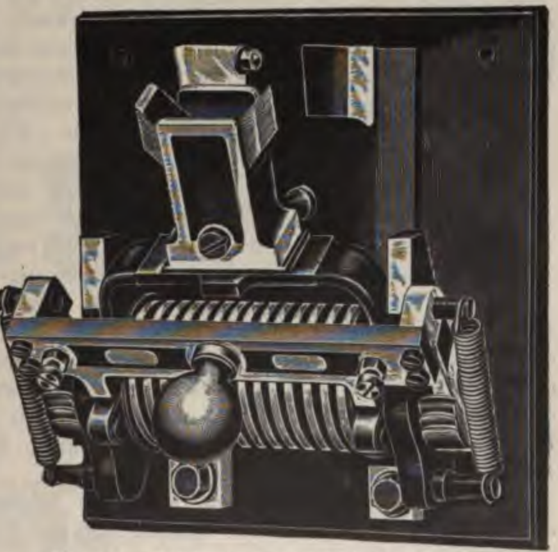


Fig. 118. Minimalautomat (Voigt & Haeffner).

* Vgl. § 107 B, Hilfseinrichtungen bei Akkumulatoren.

§ 45. Widerstände.

Allgemeines. Dient ein Stromleiter allein zum Hindurchschicken eines Stromes, wobei es darauf ankommt, daß der Leiter dem Strom einen Widerstand entgegensetzt, so bezeichnet man einen solchen Gegenstand samt seiner Ausrüstung mit dem Namen „Widerstand“ oder „Rheostat“. Jeder Widerstand erzeugt beim Stromdurchgang Wärme, die da, wo es nicht um Wärmeerzeugung zu tun ist, als Verlust an mechanischer Arbeit zu rechnen ist.

In den Betrieben und im Laboratorium braucht man sowohl unveränderliche Widerstände, als auch solche, die mit einem leichten Handgriff verändert werden können. Je nach dem Verwendungsbereich sind die Widerstände sehr verschieden. Die wichtigsten Ausführungsformen seien im folgenden herausgegriffen, soweit sie allgemeiner Bedeutung sind. Die wichtigsten Widerstandsmaterialien sind in der Zusammenstellung von Seite 56 (§32, E) mit * bezeichnet.

A. Meßwiderstände.

Bei Meßwiderständen kommt es allein darauf an, daß sie eine bestimmte, möglichst scharf feststellbare Ohmzahl besitzen. Sie arbeiten zugunsten höchster Konstanz der Ohmzahlen mit sehr geringer Erwärmung. Nickelin verschiedener Fabrikate kommt häufig vor, Manganin* ist von der Reichsanstalt als zuverlässig erkannt worden.

I. Stöpselrheostate.

Stöpselrheostate sind im Laboratorium gebrauchte, so genau wie möglich abgeglichene Schwachstromwiderstände, deren Ohmzahl angegeben ist. Ihre Widerstandsdrähte müssen auf das sorgfältigste gegen äußere Einflüsse geschützt sein, schon ihre Berührung mit der Hand ist zu vermeiden. Alle feinen Meßwiderstände müssen so gewickelt sein, daß die Spulen keine magnetische Wirkung ausüben. Zu dem Zweck verfährt man bei der Wicklung nach dem Schema der Fig. 119, dem Sinn nach so, als ob man den Draht in der Mitte umgeknickt hätte, in Wirklichkeit wickelt man zugleich von zwei gleichen Spulen ab; die Enden dieser beiden Spulen werden vor dem Beginn des Wickelns verlötet und in Isoliermaterial eingepackt; es laufen beim Wickeln der Widerstandsspule auf diese Weise zwei Drähte gleichzeitig auf. Man nennt diese Wicklung zweidrähtig (bifilar). Das Wickeln geschieht auf der Wickelbank (Drehbank). Der Strom muß durch ebensoviel Windungen bis zur Mitte fließen, wie er im umgekehrten Windungssinn auf dem Rückwege zu durchlaufen hat.

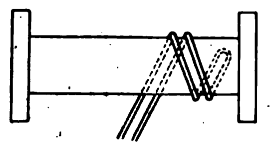


Fig. 119. Zweidrähtige Wicklung.

Die Spulenhülsen werden aus Holz hergestellt und in Paraffin ausgekocht. Die Widerstände umgibt man mit Holzkästen. Bei Wider-

* Eine Legierung von Nickel, Mangan und Kupfer, hergestellt von der Isabellenhütte bei Dillenburg.

standssätzen ist die übliche Anordnung durch Fig. 120 schematisch gegeben. Auf der Oberseite des Kastens befinden sich eine Anzahl voneinander isolierter Messingschienen auf Hartgummi. Jeder Widerstandsdraht ist mit dem einen Ende an die vorherige, mit dem anderen Ende an die nächste Metallschiene angeschlossen. Zwischen zwei Messingschienen kann überall ein Messingstöpsel eingesteckt werden. Der Strom gelangt dort, wo ein Stöpsel steckt, unmittelbar von der einen Schiene zur anderen, ohne daß er einen Widerstandsdraht zu durchlaufen hat. Wo aber ein Stöpsel gezogen ist, muß der Strom die Spule durchfließen, die zwischen den beiden Metallschienen liegt. Ist der Stöpsel gesteckt, so ist dem unten liegenden Widerstand der Stöpsel parallel geschaltet mit seiner Ohmzahl, die verschwindend gegen die Ohmzahl der Spule ist. Der Strom geht daher nur zu verschwindendem Bruchteil durch den Widerstandsdraht.

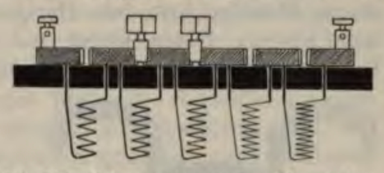


Fig. 120. Schema eines Stöpselrheostaten.

Bei Widerstandssätzen teilt man so, daß alle vorkommenden Werte mit möglichst wenig Teilstücken herstellbar sind, z. B. nach den auch bei Münzen und Gewichten üblichen Abstufungen:

1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50 usw. Ohm.

Der Widerstandskasten der Fig. 121 enthält mit 16 Stufen im ganzen 11110 Ohm. Es ist selbstverständlich, daß die Spulen mit größten Ohmzahlen die dünnsten Drähte besitzen und daher die geringsten Ströme vertragen. Im Zweifel über zulässige Stromstärken rechnet man sie zweckmäßig überschlägig nach dem Grundsatz nach, daß auf einen Abteil nicht mehr als im Maximum 1 Watt für kurze Zeit des Stromdurchganges entfällt. Für die höheren Ohmzahlen kommt auch die Isolationsfähigkeit der zweidrähtigen Wicklung in Frage, die bei den besten Rheostaten sehr hoch, bei den gewöhnlichen aber nicht wesentlich über 100 Volt gesteigert werden kann. Beim Arbeiten mit Rheostaten zieht man zweckmäßig zuerst die Stöpsel der neu gebrauchten, und steckt darauf die Stöpsel in die kurz zu schließenden Stufen.



Fig. 121. Stöpselrheostat (Hartmann & Braun).

II. Normalwiderstände der Reichsanstalt.

Durch die Reichsanstalt ist Normalwiderständen eine Form gegeben worden, wie sie durch die Figuren 122 und 123 angedeutet ist. In einem Metallgehäuse mit Hartgummideckel befindet sich der Widerstandskörper, dessen Enden mit den herausragenden Kupferbügeln in Verbindung stehen. Die Bügelenden hängen zur Stromzuleitung in



Fig. 122. Normalwiderstand von 0,1 Ohm.



Fig. 123. Normalwiderstand von 0,01 Ohm.

Quecksilbernäpfen. Beim Gebrauch befindet sich der Widerstand bis über den Hartgummideckel unter Petroleum zur Kühlung und Temperaturmessung vermittelst eines in die mittlere Öffnung gesteckten Thermometers. Löcher im Boden und in dem Mantel begünstigen die Bewegung des Petroleums. Man läßt die Temperatur der Widerstände nicht wesentlich über 20°, etwa bis 25° höchstens, steigen, da ihre Ohmzahlen für 20° geregelt werden. Die Reichsanstalt untersucht und beglaubigt solche Widerstände, wenn sie ihren Bedingungen entsprechen.

Die gebräuchlichsten Größen der Reichsanstaltsnormalien sind:

1000, 100, 10, 1, 0,1, 0,01, 0,001 Ohm;

bei sehr kleinen Ohmzahlen bis zu 0,01 Ohm erhalten die Normalien (s. Fig. 123) besondere Klemmen für die Spannungsabnahme, da die Übergangswiderstände und die Bügel selbst von hier ab schon Störungen erkennen lassen. Die Reichsanstalt schreibt für genaueste Messungen für ihre normale in der Abbildung dargestellte Type höchstens folgende Ströme vor, die jedesmal der Belastung 1 Watt entsprechen:

für 1000, 100, 10, 1, 0,1, 0,01, 0,001 Ohm
0,032, 0,1, 0,32, 1, 3,2, 10, 32 Ampere.

B. Metallwiderstände für Betriebszwecke.

I. Allgemeines. Betriebswiderstände haben die Aufgabe, mit möglichst billigen Mitteln die ihnen zugewiesene elektrische Arbeit in Wärme umzusetzen. Dabei besteht in zweiter Linie auch die Anforderung, daß die Widerstände bei verschiedenen Temperaturen angenähert konstante Ohmzahl haben. So kommen auch hier teuere

Nickellegierungen in Frage, die meistens unter dem Namen „Nickelin“ in verschiedenen, auch im Preise auseinandergehaltenen Sorten in den Handel gebracht werden.*

Zu der Aufgabe, dauernd elektrische Arbeit in Wärme umzusetzen, gehört auch eine rege Wärmeabgabe. Je heißer ein Körper ist, um so mehr Wärme gibt er an seine Umgebung ab. Daher läßt man Betriebswiderstände zur Ausnutzung des Materiales bedeutend heißer werden, als Meßwiderstände. Man steigert die Erwärmung bis auf 200 Grad und mehr, wobei die Widerstandsänderung guten Nickelins noch nicht empfindlich ist, dagegen ist jede erkennbare, auch die dunkelste Rotglut nicht mehr zulässig. Die Wärmeabgabe wird durch reichliche Luftumspülung gesteigert oder bei kurzzeitig durchflossenem Widerständen durch Ölkühlung erhalten. Bei Luftzutritt nimmt das Nickelin nach längerer Zeit der Erwärmung einen schwärzlichen Überzug an, der für die Wärmeabgabe förderlich ist.

II. Ausführung von Betriebswiderständen.

Bei Betriebswiderständen werden die metallischen Leiter nur auf feuersicheren Materialien (Porzellan, Steingut, Schiefer, Asbest) blank untergebracht. Sie sind gegen zufällige Berührung zu schützen. Brennbare Teile sind aus der Umgebung von Widerständen fernzuhalten.

Das Nickelin wird in Form von Drähten mit Kreisquerschnitt oder in Form von Bändern hergestellt. Die feinsten, an Fäden erinnernden Bänder heißen Nickelinplätte. Nickelindraht-Asbestschnur liegt im Verwendungsbereich zwischen Plätte und gewöhnlichen Drähten.

Drähte werden zu Spiralen gewickelt und stark gespannt (Spiraldrahtwiderstände), Bänder werden gewellt und mäßig gespannt (Blechwiderstände); sicherer ist die Unterbringung des Widerstandmateriales auf Porzellanzylindern:



Fig. 124. Porzellanzylinder.

Ein zylinderförmiger Porzellankörper enthält am Umfang ein Porzellangewinde, auf dessen Grund der Draht fest aufgelegt wird. Die Porzellanrippen zwischen den Gängen sind so hoch, daß auch der erwärmte und dadurch gelockerte Draht nicht herausspringen kann. Anfang und Ende des Drahtes sind am Porzellankörper befestigt. Die Stromzuführung erfolgt bei größeren Zylindern nach der Abbildung Fig. 124 durch übergeschobene aufgeklemmte und daher einstellbare Ringe, wobei die Drähte über den Porzellanrippen vorstehen. Bei kleineren Widerstandszylindern geschieht die Verbindung durch Verklemmen und Verlöten der Drahtenden. Für solche Zylinder empfiehlt sich

* Basse & Selve, Altena; F. A. Lange, Auerhammer bei Aue i. S. (Geitners Nickelin); Vereinigte Deutsche Nickelwerke, A.-G., Schwerte i. W., vormals Fleitmann, Witte & Co.

auch die Asbestschnur. Die Porzellanzylinder werden nach Bedarf aufgereiht und zu Widerstandsrahmen vereinigt.

Die Plätte findet meistens Verwendung für Spannungsmesser-Vorschaltwiderstände und wird zu diesem Zweck auf Glimmerplatten mit geringem Abstand von Windung zu Windung und in nur einer Schicht aufgewickelt. Überzüge geeigneter Lacke oder Emailfarben sichern die gegenseitige Lage der Windungen.

Es gibt eine ganze Reihe von Möglichkeiten, Widerstandskörper für bestimmte Anforderungen herzustellen, deren Aufzählung hier zu weit führen würde. Feuerfeste Isolierstoffe werden in verschiedenster Art mit Widerstandsmaterialien verarbeitet.

Die Berechnung der Betriebswiderstände richtet sich nach den äußeren Bedingungen: dem Zweck, der Verlegungsart, der Belastungsdauer, der Art der Kühlung, dem verlangten Genauigkeitsgrad, der zugelassenen Erwärmung u. a. m.

Für offen verlegte, reichlich mit frischer Luft umspülte, zu Spiralen gespannte oder auf Porzellanzylindern untergebrachte Widerstände, die eine Temperatur von 100 bis 200° annehmen dürfen, ist eine einfache Norm, auf 1 qcm abkühlende Oberfläche dauernd 1 Watt ausströmen zu lassen. Für gespannte Drähte ist dabei die Oberfläche des Drahtes, für Porzellanzylinder (nicht zu großer Steigung im Verhältnis zum Drahtdurchmesser) die roh als Zylindermantel gerechnete äußere Fläche in Rechnung zu setzen.

Mit dieser Norm ergeben sich für allseitig luftumspülte Nickelindrähte (für $c = 0{,}5$) folgende Stromstärken als zulässig:

Durchmesser mm	Stromstärke Ampere	Durchmesser mm	Stromstärke Ampere
0,2	0,628	1,6	14,2
0,4	1,77	1,8	17,1
0,6	3,26	2,0	19,9
0,8	5,01	2,2	22,9
1,0	7,01	2,4	26,1
1,2	9,22	2,6	28,6
1,4	11,63	2,8	32,8

Für Dauerbelastung empfiehlt es sich die zu wählenden Durchmesser nach oben abzurunden. Für kurzzeitige, nach Sekunden zählende Belastung mit darauffolgender reichlicher Ruhepause vertragen die angegebenen Drähte etwa den 1,5 fachen Wert des angegebenen Stromes. Parallelschaltung von Drähten oder Wahl von Nickelinbändern führt bei gleicher Erwärmung zu Materialersparnis. Der Gedanke, dünne Metalle zu verwenden, wird auf das äußerste getrieben durch die Anwendung chemisch oder galvanisch niedergeschlagener Metallschichten auf isolierender, hitzebeständiger Grundlage.

Eine n-fache Stromsteigerung hat bei einem Widerstand die n^2-fache Steigerung der sekundlich auftretenden Wärmemenge zur Folge.

Beispiel. Berechnung eines Porzellanzylinders: Der mittlere Durchmesser der Windungen eines Porzellanzylinders beträgt $D = 8$ cm, die Steigung des Schraubenganges $h = 0{,}5$ cm; die größte einstellbare Länge zwischen den Stellringen sei $H = 22$ cm. Der Zylinder sei mit Nickelindraht ($c = 0{,}5$) von $d = 2{,}6$ mm Durchmesser bewickelt. Wieviel Ampere verträgt der Zylinder mit der Norm, daß auf 1 qcm äußerer kühlender Oberfläche 1 Watt entfalle?

Es ist:

Der Umfang einer Windung: $D \cdot \pi = 8 \cdot \pi = 25{,}1$ cm $= 0{,}251$ m;

die Anzahl d. durchfl. Windungen: $z = H : h = 22 : 0{,}5 = 44$;

die Länge des durchfl. Drahtes: $l = D \cdot \pi \cdot z = 0{,}251 \cdot 44 = 11{,}05$ m;

der Querschnitt des Drahtes: $q = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{2{,}6^2 \cdot \pi}{4} = 5{,}30$ qmm;

der Widerstand des Drahtes: $w = \frac{l}{q} \cdot c = \frac{11{,}05}{5{,}30} \cdot 0{,}5 = 1{,}04$ Ohm;

die Oberfläche des Zylinders: $O = D \cdot \pi \cdot H = 25{,}1 \cdot 22 = 552$ qcm;

die zulässige Wattzahl: $L = O \cdot 1 = 552$ Watt;

die zulässige Stromstärke: $I = \sqrt{\frac{L}{w}} = \sqrt{\frac{552}{1{,}04}} = 23$ Ampere.

Sind Widerstandsdrähte nur kurzzeitig beansprucht, während darauf längere Zeit für die Abkühlung folgt, so bringt man sie vorteilhaft in Form von Spiralen ganz unter Öl (Maschinenöle, Harzöle). Flüssigkeiten nehmen mit einer bestimmten Temperaturerhöhung verhältnismäßig viel Wärme auf und steigern ihre Temperatur nicht über den Siedepunkt. Daher ist die Umgebung der Spiralen sehr bereit zur Wärmeaufnahme, und die Wattzahl auf 1 qcm der Oberfläche des Widerstandsmateriales kann etwa gegen die für Luft angegebenen Werte auf den 9 fachen, die Strombelastung der Drähte daher etwa auf den 3 fachen Wert gesteigert werden. Die Materialersparnis wird erst deutlich klar, wenn man berücksichtigt, daß eine n-fache Änderung des Querschnittes bei demselben Widerstand auch die n-fache Änderung der Drahtlänge ergibt, wobei der Materialaufwand den n^2-fachen Wert annimmt.

Beispiel. Ölwiderstand: Ein Widerstand soll zeitweilig einen $t = 10$ Sekunden dauernden Strom von $I = 50$ Ampere führen und dabei eine Spannung $E = 110$ Volt vernichten. Der Widerstandsdraht soll in einem Ölbehälter untergebracht werden, der $P = 3{,}5$ kg Öl enthält. Es soll gerechnet werden, als ob alle Wärme nur vom Öl aufgenommen würde. Die spezifische Wärme des Öles soll $\sigma = 0{,}45$ betragen. Die Ausgangstemperatur nach einer längeren Abkühlungszeit betrage $\tau_1 = 25$ Grad. Wie oft kann der Widerstand unmittelbar

nacheinander in oben angegebener Weise benutzt werden, wenn die Höchsttemperatur des Öles $\tau_2 = 60$ Grad nicht überschreiten soll?

Es beträgt:

Die Wärmemenge für einmalige Einschaltung:

$$Q = 0{,}00024 \cdot E \cdot I \cdot t = 0{,}00024 \cdot 110 \cdot 50 \cdot 10 = 13{,}2 \text{ Kal.}$$

Die aufnehmbare Wärmemenge des Öles:

$$Q' = P \cdot \sigma(\tau_2 - \tau_1) = 3{,}5 \cdot 0{,}45\,(60 - 25) = 55 \text{ Kal.}$$

Die Zahl der zulässigen, unmittelbar aufeinander folgenden Einschaltungen der angegebenen Art:

$$z = \frac{Q'}{Q} = \frac{55}{13{,}2} = 4{,}17 \sim 4.$$

Die Drahtdicke: nach der angegebenen Norm kann ein Draht verwendet werden, der in Luft dauernd $50:3 = 16{,}66$ Ampere vertragen würde. Gewählt sei aus der Tabelle der Draht von $d = 1{,}8$ mm Durchmesser für 17,1 Ampere. So ergibt sich als die

$$\text{Drahtlänge } l = \frac{E}{I} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{1}{c} = \frac{110}{50} \cdot \frac{1{,}8 \cdot 1{,}8 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{1}{0{,}5} = 11{,}2 \text{ m.}$$

III. Die Regelung der Widerstände.

Man unterscheidet feste, einstellbare und regelbare Widerstände. Die Einstellbarkeit ist so zu denken, daß nach Fertigstellung einer Anlage einmal die gewünschten Stromverhältnisse ausgeprobt und durch Klemmvorrichtungen, z. B. übergeschobene Ringe bei Porzellanzylindern, in der Weise gesichert werden, daß eine Neueinstellung nur mit Werkzeugen vornehmbar ist, etwa mit Schraubenzieher oder Mutternschlüssel.

Soll eine Regelung betriebsmäßig häufig oder andauernd vorgenommen werden, so wählt man ein bequemeres Mittel: Man unterteilt den Widerstand in eine Anzahl von Stufen, so daß die Ohmzahl mit Hilfe einer Kurbel und zugehöriger Kontaktbahn durch eine Drehbewegung leicht geändert werden kann. Auf einer

Fig. 125. Schema eines Kurbelwiderstandes.

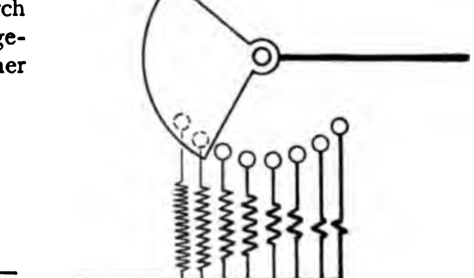


Fig. 126. Parallel zu schaltende Spiralen.

Platte aus Marmor oder Schiefer befinden sich zentrisch angeordnet die Kontakte, alle von gleicher Höhe und nahe beieinander. Im Mittelpunkt der Krümmung ist die Metallkurbel drehbar, zu der der

eine Zuleitungsdraht führt. Die Kurbel schleift über die Kontaktbahn mit festem Anpressungsdruck und bei höheren Stromstärken unter Anwendung lamellierter Federn. Die Kurbel ist breiter als der gegenseitige Abstand der Kontakte. Zwischen den Kontakten liegen die einzelnen Teile des Widerstandes, die stufenweise zu- oder abgeschaltet werden können, indem man die Kurbel verstellt. Für einen Widerstand, der schließlich eine direkte Verbindung herstellen soll, zeigt das Schema die Fig. 125.

Statt der Hintereinanderschaltung der Streifen kann auch mit Parallelschaltung gearbeitet werden, wofür Fig. 126 das Schema gibt. An Stelle der Kurbel tritt hier ein Metallsektor. Für die Ausnutzung des Widerstandsmateriales sind beide Schemata, Figg. 125 und 126 gleichwertig.

Hinter dem Knopf für größte Ohmzahl wird meistens ein Blindkontakt angebracht, wenn der Widerstand auch zur Ausschaltung benutzt werden soll. Häufig wird ein Blindkontakt durch das Zeichen ∞, ein Kurzschlußkontakt durch eine Null hervorgehoben. Widerstände der hier bezeichneten Art führen häufig den Namen der Stromregler (Regulatoren). Im Gegensatz zu der seltener vorkommenden geradlinigen Führung des Schleifstückes spricht man auch von Kurbelwiderständen.

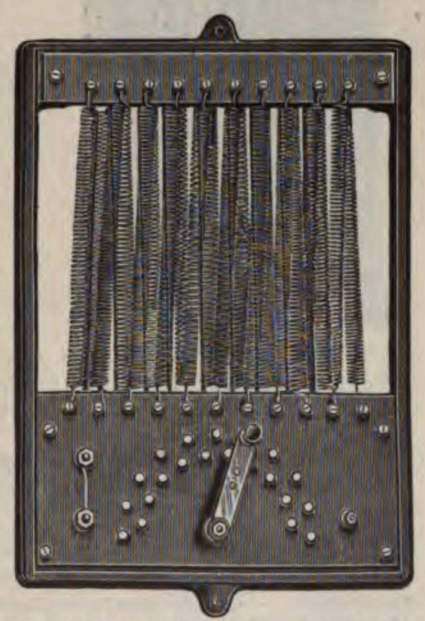


Fig. 127. Ausführungsform eines Kurbelwiderstandes.

Die Ausführung eines Kurbelwiderstandes zeigt Fig. 127. Der Rahmen besteht aus Gußeisen, eine obere Leiste und eine unten befindliche Platte aus Schiefer. Die Spiralen sind in zwei Schichten angeordnet und durch Messing-Gewindebolzen, die den Schiefer durchsetzen, hintereinandergeschaltet. Von den unten liegenden Bolzen führen auf der Rückseite die jedesmaligen Abzweigungen in Form von Kupferdrähten zu den Kontakten.

Die Kontaktknöpfe sind zur besseren Raumausnutzung abwechselnd versetzt. Ein Sicherungsstreifen schützt den Stromkreis in der Kurzschlußstellung vor zu starkem Strom, was nur bei Laboratoriumswiderständen Zweck hat.

Einen für Betriebszwecke hergestellten Widerstand zeigt Fig. 128, bei dem die Konstruktion sich an das vorige Beispiel, Fig. 127, an-

lehnt. Dagegen besitzt hier die Kurbel zum Zweck der Ermöglichung sicheren Kontaktes eine Führungsschiene, und die Spiralen sind durch gelochtes Blech geschützt. Die Kurbel dreht sich auf einem mit Isolierfutter im Rahmen eingesetzten Dorn. Ebenso brauchen die Befestigungsbolzen der Führungsschienen isolierende Hülsen.

Einige Gedanken kehren hier wieder, die bereits bei den Ausschaltern vorkamen. Bisweilen macht man den Drehpunkt der Kurbel stromlos, indem eine Stromzuführungsschiene konzentrisch zur Kontaktbahn angeordnet wird. Eine von der Zuführungsschiene zur Kontaktbahn durchgehende Feder aus Hartkupfer oder Bronze vermittelt dann



Fig. 128. Ausführungsform eines Kurbelwiderstandes.

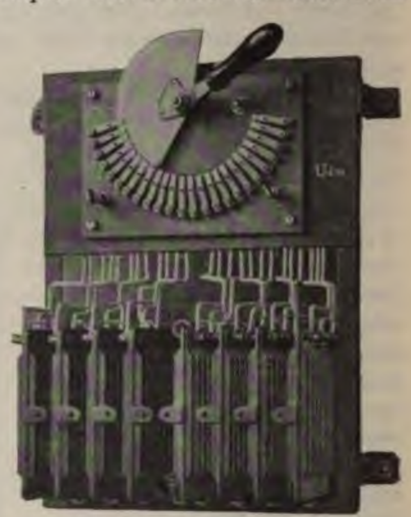


Fig. 129. Ausführungsform eines Widerstandes in Parallelschaltung.

den Stromübergang, wobei das Material der Kurbel nun beliebig ist. Für Griffe kann außer sonstigen Isoliermaterialien auch Holz verwendet werden.

Fig. 129 stellt einen Widerstand dar, der nach dem Schema Fig. 126 geschaltet ist. Ein gelochtes Schutzblech ist hier abgenommen. Die Widerstandsdrähte sind in Email eingebettet, die einzelnen Widerstandskörper erinnern an Rippenheizkörper. Der Metallsektor wird an jedem Kontakt zwischen zwei Bronzefedern geschoben.

Sollen feinere Stromabstufungen möglich sein, als das mit einer einzigen Kontaktbahn denkbar ist, so verwendet man nach dem Schema Fig. 130 zwei Kurbeln. Seien nach diesem Schema rechts beispielsweise 10 Stufen zu je 1 Ohm, links 10 Stufen zu je 0,1 Ohm angewendet, so kann man bis zu 11 Ohm von Zehntel zu Zehntel Ohm einstellen, also sind mit 22 Knöpfen $11 \times 11 = 121$ Kurbelstellungen oder 111 Stromstufen möglich. Die Regelbarkeit läßt sich durch

weitere Hintereinanderschaltungen beliebig ausdehnen, z. B. durch Hinzunahme eines Widerstandes von 10 × 0,01 und 10 × 10 Ohm usw.

Es kommen im Laboratorium Widerstände vor, deren Anordnung nach Fig. 131 schematisch dargestellt ist. Man schaltet die Elektrizitätsquellen an die Drähte I und II, dann wird der ganze unveränderliche Widerstand vom Strom durchflossen. Mit Hilfe der Kurbeln kann man an den Drähten 1 und 2 stufenweise beliebige zwischenliegende Spannung erreichen, je nach der Größe des durch die Kurbeln eingeschlossenen Widerstandes.

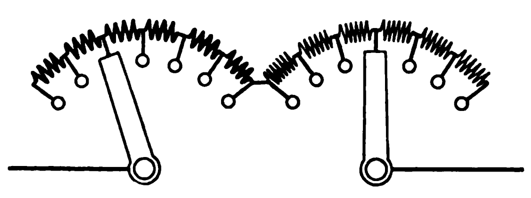


Fig. 130. Schema für die Regelung durch zwei Kurbeln.

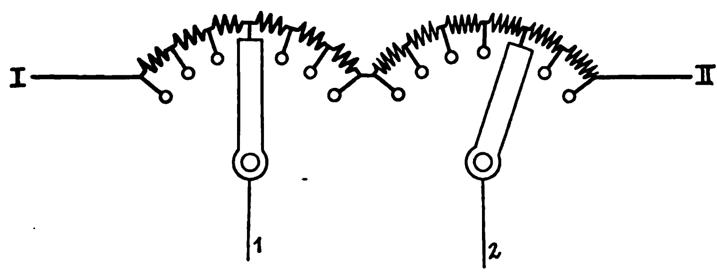


Fig. 131. Abzweigwiderstand.

Für die Wahl der Abstufungen eines Widerstandes kommt vor allem der Zweck in Betracht, und es wird später wieder davon die Rede sein (§ 93 Vorb. und § 94 B). Hier sei darüber folgendes bemerkt:

Dient ein Rheostat zur Stromregelung in einem Kreise mit konstanter EMK und verschwindend kleinem übrigen Widerstande, so ist eine Einteilung zu gleichen Widerstandsstufen unzweckmäßig, denn die Stromstufen sind bei größerem Widerstande gering und nehmen, je weniger Widerstand im Kreise ist, immer mehr zu. So z. B. erhält man bei 100 Volt und 10 × 10 Ohm folgende Stromstärken:

bei 100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	Ohm
1	1,111	1,25	1,429	1,667	2,0	2,5	3,333	5	10	∞	Ampere.

Der Strom ist allgemein:

$$I = \frac{E}{W},$$

wobei W sich hier nach einer arithmetischen Reihe ändert.

Das Arbeiten mit solchen Widerständen setzt daher Vorsicht voraus, und die Sicherung bei Fig. 127 hat hierdurch ihre Bedeutung. Auch im Gebrauch der Widerstände nach Schaltung der Fig. 130, die innerhalb der einzelnen Kontaktbahnen gleiche Widerstandsstufen haben müssen, wenn man den vollen Vorteil der Anordnung ausnutzen will, ist die Eigenart obiger Stromabstufungen zu berücksichtigen, denn für allmähliche Stromsteigerung ist vor dem Abschalten einer groben Stufe die ganze Reihe der nächst feineren Stufen einzuschalten, vor allem, wenn wenig Widerstand im Kreise ist.

Wünscht man unter Voraussetzuug konstanter EMK und geringen übrigen Widerstandes im Kreise die Stromstufen in einer arithmetischen Reihe, so kommt man zu den umgekehrten Verhältnissen gegen den vorigen Fall. So z. B. ergibt sich für 100 Volt und Stromstufen von 1 zu 1 Ampere:

bei 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ampere
100	50	33,33	25	20	16,67	14,29	12,5	11,11	10	Ohm zwischen der Leitung
oder 50	16,67	8,33	5	3,33	2,38	1,79	1,39	1,11	10	Ohm der einzelnen Stufen

wobei die letzten 10 Ohm unausschaltbar zu denken sind oder sich in weitere Stufen zerlegen, wenn der Strom weiter gesteigert werden soll.

Häufig kommen Abstufungen derart vor, daß der nächstfolgende Kontakt stets ein bestimmtes Vielfaches der Stromstärke des vorherigen Kontaktes ergibt. Aus der allgemeinen Formel

$$W = \frac{E}{I},$$

wobei sich in diesem Fall I nach einer geometrischen Reihe ändert, folgt, daß auch der Widerstand zwischen den Leitungen bei konstanter Spannung sich nach einer geometrischen Reihe ändern muß. Schließlich sind auch die Einzelwiderstände von Kontakt zu Kontakt geometrisch abgestuft. Der Exponent der Stromreihe ist der reziproke Wert desjenigen beider Widerstandsreihen.

Beispielsweise erhält man bei 100 Volt und bei Stromstufen mit dem Exponenten 1,5 folgende Werte:

für 1	1,5	2,25	3,38	5,06	7,59	11,39	Ampere
100	66,67	44,44	29,67	19,75	13,17	8,78	Ohm zwischen der Leitung
oder 33,33	22,23	14,77	9,92	6,58	4,39	8,78	Ohm der einzelnen Stufen

wobei wieder die letzten 8,78 Ohm unausschaltbar zu denken sind oder sich weiter zerlegen, wenn der Strom weiter gesteigert werden soll.

Beispiel. Es ist ein Widerstand für einen Projektionsapparat zu berechnen; der Lichtbogen braucht eine konstante Spannung $E_1 = 40$ Volt. Die Betriebsspannung werde an den Klemmen der Zuleitung konstant zu $E = 110$ Volt angenommen. Die Widerstände der Leitungsdrähte sollen vernachlässigt werden. Die Stromstärke des Lichtbogens soll auf 3, 3,68, 4,5, 5,52, 6,75, 8,28 und 10,15 Ampere gebracht werden können. Für den Widerstand werde Nickelindraht ($c = 0,5$) zu Spiralen gespannt verwendet. Außer der Länge und dem Querschnitt des Drahtes der einzelnen Stufen ist ein Schaltungsschema anzugeben.

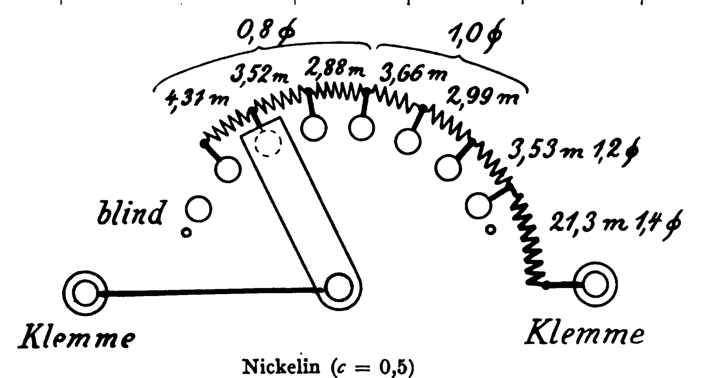
Am Widerstand liegt konstant die Spannung $E_2 = E - E_1 = 110 - 40 = 70$ Volt. Der Widerstand W zwischen den Zuleitungen des Rheostaten ergibt sich jedesmal zu

$$W = \frac{E_2}{I},$$

wobei I die jedesmalige Stromstärke bedeutet. Die Einzelwiderstände w von Kontakt zu Kontakt werden stets durch Bildung der Differenz zweier aufeinanderfolgender Werte W gefunden. Die Drahtquerschnitte werden nach der für frei in Luft gespannte Spiralen gültigen Tabelle durch Abrundung nach oben aus den Stromstärken bestimmt. Die Längen l der Drähte zwischen den einzelnen Stufen erhält man nach der Formel

$$w = \frac{l}{q} \cdot c \quad \text{zu} \quad l = \frac{w \cdot q}{c}.$$

Stufe	$I_{\text{Amp.}}$	W_{Ohm}	w_{Ohm}	d_{mm}	q_{qmm}	l_{m}
1	3	23,33	4,28	0,8	0,503	4,31
2	3,68	19,05	3,50	0,8	0,503	3,52
3	4,5	15,55	2,86	0,8	0,503	2,88
4	5,52	12,69	2,33	1,0	0,786	3,66
5	6,75	10,36	1,90	1,0	0,786	2,99
6	8,28	8,46	1,56	1,2	1,131	3,53
7	10,15	6,90	6,90	1,4	1,542	21,30



Nickelin ($c = 0,5$)

Fig. 132. Schema eines berechneten Widerstandes.

Das Schema für den Widerstand dieses Beispieles zeigt Fig. 132; mit diesem Schema ist der elektrische Teil für die Herstellung des Widerstandes durch den Mechaniker erledigt.

C. Flüssigkeitswiderstände.

Fließt ein Strom durch eine Flüssigkeit, so tritt dabei eine chemische Wirkung auf, die stets mit einer elektromotorischen Gegenkraft verbunden ist. Bei den gewöhnlich vorkommenden Ausscheidungsprodukten übersteigt die EMGK kaum einige Volt. Anderseits tritt, wie bei metallischen Leitern, in der Zersetzungszelle ein Widerstand auf proportional zur Länge des Stromweges und umgekehrt proportional zu seinem Querschnitt. Der spezifische Widerstand der Lösungen ist bedeutend größer als bei den Metallen, wofür in der Tabelle des § 32 E mit Schwefelsäure größter Leitfähigkeit und mit Kochsalz zwei Beispiele gegeben sind. Flüssigkeiten eignen sich daher für kurzzeitige Beanspruchung als Widerstände dort, wo die EMK des Kreises nicht zu gering ist, und wo eine chemische Wirkung nicht störend auftritt. In dieser Hinsicht ist am besten die Verwendung von Kupfervitriollösung mit Kupferelektroden, bei denen der Strom 2 Ampere auf das qdm vorteilhaft nicht überschreitet. Das Kupfer wird mit geringer Gegenspannung von der einen Platte zu anderen transportiert; ist die eine Platte schließlich zu dünn geworden, so kehrt man den Strom um. Flüssigkeitswiderstände eignen sich besser für Wechselstrom als für Gleichstrom, da sich hier keine Ausscheidungsmengen ansammeln, sind hier allerdings auch mit Vorsicht zu gebrauchen*. Außerdem können an Flüssigkeitswiderstände keine hohen Genauigkeitsansprüche gestellt werden.



Fig. 133. Flüssigkeitswiderstand für Versuchszwecke.

Ein Vorzug in der Verwendung von Flüssigkeiten liegt in der leichten Einstellbarkeit der Ohmzahl durch Veränderung des Verdünnungsgrades, denn reines Wasser ist fast ein Isolator, und in der An-

* Vgl. im Wechselstromgebiet die Flüssigkeitskapazität.

nehmlichkeit nicht an bestimmte Widerstandsstufen gebunden zu sein, denn man kann die Elektroden beliebig weit auseinanderrücken oder man kann sie beliebig tief eintauchen. Eine allmählich, nicht stoßweise erfolgende Stromsteigerung ist hier leicht herstellbar.

Eine in Laboratorien verwendbare Anordnungsweise zeigt Fig. 133; über einen Steintrog sind zwei dicke Kupferdrähte gelegt, an denen die Elektroden hängen. Bei Belastungsproben von Maschinen arbeitet man vorteilhaft mit im Freien aufgestellten Flüssigkeitswiderständen, bestehend aus hölzernen Fässern mit Blei- oder Eisenblech-Elektroden, die am Rande des Fasses durch hölzerne Querleisten aufgehängt sind. Man füllt das Faß zunächst mit Wasser ohne Zusätze und regelt dann den Strom durch die Zusätze.

Bei diesen Widerständen mit beweglichen Platten ist Vorsicht zur Vermeidung von Kurzschlüssen ganz besonders geboten, da der Inhalt bei hoher Belastung zum Sieden kommt und in Bewegung gerät. Auch Metallreifen der Fässer, vor allem der obere, können leicht Kurzschlüsse herbeiführen.

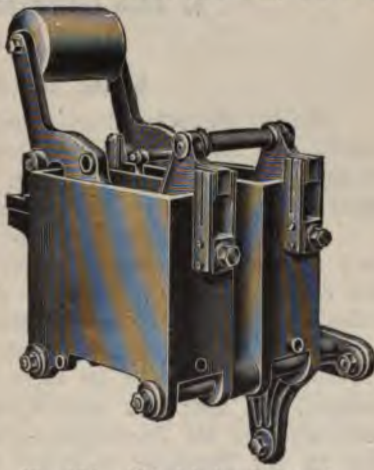


Fig. 134. Flüssigkeitswiderstand (technische Ausführung).

Eine weitere Anordnungsweise nach dem Bilde der Fig. 134 ist für betriebsmäßige Verwendung gedacht; der eine Pol ist an das zweiteilige Gefäß (Gußeisen), der andere an zwei drehbare, vom Gefäß im Drehpunkt isolierte Eisenplatten angeschlossen. Letztere laufen nach unten spitz zu, so daß der Widerstand durch Änderung der Eintauchtiefe beträchtlich geändert werden kann. Als Füllung für solche Gefäße wird meistens Sodalösung verwendet. In tiefster Stellung der Platten wird der Widerstand durch zwei federnde Kontakte kurz geschlossen. Die Lösung muß häufig erneuert werden. Sind die beiden Hälften voneinander isoliert, so können sie an Stelle der Parallelschaltung auch hintereinandergeschaltet werden.

D. Kohle als Widerstandsmaterial.

Der hohe spezifische Widerstand der für elektrische Zwecke hergestellten Kohleerzeugnisse legt es nahe, Kohle zu Widerstandskörpern zu verwenden. Die Kohle in Luft sehr heiß werden zu lassen verlohnt sich jedoch nicht, da sie durch innere, mikroskopisch kleine Lichtbogen schon allmählich verbrennt, wenn sie äußerlich noch weit von der Verbrennungstemperatur entfernt ist.

Hält man den Sauerstoff von der Kohle fern, so kommt man im wesentlichen zur elektrischen Kohleglühlampe, die den Gegenstand der

nächstfolgenden Betrachtungen bildet, und die in vielen Fällen mit Vorteil auch als Widerstand verwendet werden kann. Man vereinigt dann meistens eine größere Anzahl von Lampen zu sogenannten Glühlampenbatterien.

Kohle hat einen negativen Temperaturkoeffizienten; der Widerstand einer normal leuchtenden Kohleglühlampe ist etwa halb so groß als der Widerstand derselben Lampe bei Zimmertemperatur.

---

7. Kapitel.

Die elektrische Beleuchtung.

I. Die Glühlampen (vgl. § 19, 1).

---

§ 46. Die Kohleglühlampe.

Kohle, ein sehr hitzebeständiges Material, behält, sofern nur der Zutritt von Sauerstoff ausgeschlossen ist, auch in der Weißglut große Festigkeit und eignet sich daher, wie die weite Verbreitung der Kohleglühlampen zeigt, gut für Beleuchtungszwecke.

Obgleich der Grundgedanke für die Glühlampe alt ist[Hist. 29]), gelang die Ausführung erst, seitdem man die Metallfaser verließ und sich der Kohle zuwandte, denn die damals in Frage kommenden Metalle befanden sich bei der nötigen Weißglut sehr nahe dem Schmelzpunkt.

Einen hervorragenden Platz in der Glühlampentechnik nimmt Edison[Hist. 51]) ein; er ist nicht der erste Hersteller von Kohleglühlampen, hat aber den glücklichen Griff getan, das faserige Holz des Bambusrohres als Ausgangsmaterial für seine Lampe zu wählen. Er ließ an der Holzfaser verdickte Enden stehen und zog den dünnen Teil durch scharfkantige Öffnungen, bis die nötige Feinheit erreicht war. Dann behandelte er die Faser mit Schwefelsäure, um dem Holz seine Säfte zu entziehen. Es entstand dadurch ein Zellstoffstreifen, der nach Waschung und Trocknung in eisernen Kästen unter Luftabschluß erhitzt und dadurch in Kohle übergeführt wurde. Die verdickten Enden wurden galvanisch verkupfert, und an das Kupfer wurden die Drähte zur Stromzuführung angelötet. Die Glasbirne bekam zur Durchführung des Stromes durch ihre Wände zwei eingeschmolzene Platindrähte. Zum Einbringen der Kohlefaser wurde die zum Auspumpen der Luft mit einem Ansatzrohr versehene Birne entlang ihres Umfanges, etwa bei *a* ... *b* der Fig. 135 aufgesprengt. Nach Befestigung des Kohlebügels wurden beide Teile der Birne wieder verschmolzen. Das Auspumpen erfolgte nach Anschließen des Ansatzrohres an eine Luftpumpe. Ein zweiter glücklicher Umstand war der, daß Edison die von A. Toepler etwa 1862 konstruierte Quecksilber-

luftpumpe, die ein Vakuum von bis dahin sonst noch nicht erreichter Höhe ermöglichte, bereits vorfand. Nach dem Auspumpen wurde die Birne an der verengten Stelle des Ansatzrohres abgeschmolzen (Fig. 136) und mit einem in Fig. 137 angedeuteten Sockel versehen, der ein bequemes Anschließen der Lampe durch Einschrauben in ein zugehöriges Muttergewinde gestattete (Edisonsockel und -fassung).

Gegenwärtig wird zur Herstellung der Kohlefasern anders verfahren: Holz wird zu feinem Staub geschliffen und dann in Zellstoff übergeführt. Ein Brei aus diesem Zellstoff mit geeigneten sirupösen Bindemitteln wird mit Hilfe von Spritzen durch enge Öffnungen getrieben und so zu Fäden geformt; die Fäden werden getrocknet und auf Spulen aus Graphit aufgewickelt. Durch die Spulen erhalten die Fäden

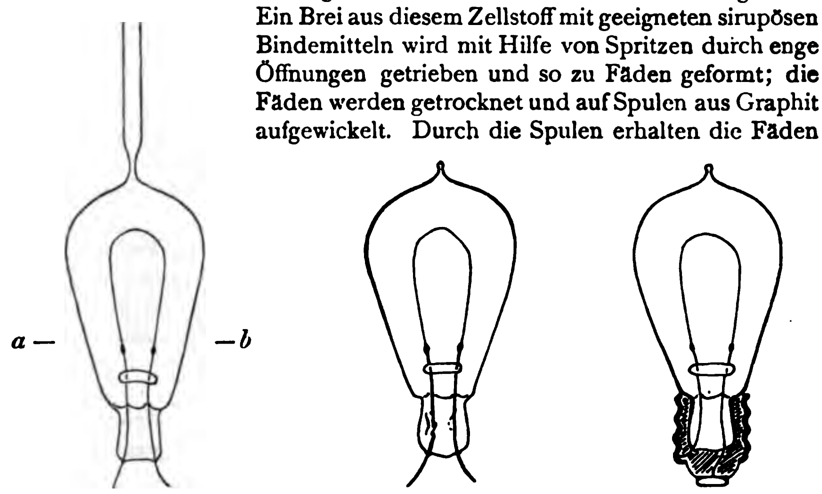


Fig. 135. Fig. 136. Fig. 137.

die Gestalt der künftigen Kohlefaser; ihre Überführung in Kohle geschieht durch Glühen der aufgewickelten Fäden in Graphit- und Eisenkästen ohne Luftzutritt. Nunmehr werden die Kohlefasern durch einen Schnitt geteilt, abgenommen und anpräpariert, d. h. an ihren Anschlußdrähten, die bereits an dem abgesprengten Teil der Birne fertig angebracht sind, befestigt. Dazu werden die Drahtenden breit geschlagen und zu Ösen geformt, so daß die Faser hineingesteckt werden kann.

Ein kohlehaltiger Kitt hält zunächst den Draht und den Faden an der „Lötstelle" nur locker zusammen; das Bindemittel des Kittes wird in einer geeigneten Atmosphäre, die ein Verbrennen der Kohle ausschließt, mit Hilfe kleiner Lichtbogen karbonisiert, wodurch nicht nur große Festigkeit, sondern auch ein guter Stromübergang erreicht wird.

Der bisher vorliegende Kohlefaden würde den Nachteil haben, nicht die gewünschte große Festigkeit aufzuweisen und an verschiedenen Stellen ungleich zu glühen, da die Fäden durch das bisherige Verfahren nicht ganz homogen werden. Eine Verbesserung der Faser wird auf folgende Weise erreicht (das Präparieren):

Ein in einem Leuchtgasstrom (ohne Zutritt von Luft) erhitzter Kohlefaden scheidet aus dem Leuchtgas Kohle aus, die sich dicht und

fest an ihn ansetzt, und die durch ihre metallisch glänzende Graphitfarbe auffällt. Da, wo der Faden heller glüht, setzt sich mehr Kohle an, als an dunkel glühenden Stellen. Wird die Faser durch einen elektrischen Strom unter Leuchtgas erhitzt, so regelt sich allmählich nach dem Gesagten die Faser so ein, daß sie an allen Stellen auf die Längeneinheit gleiche Ohmzahl aufweist und so in der ganzen Länge gleichmäßig leuchtet. Erst, wenn das erreicht ist, ist die Faser für den Gebrauch fertig.

Das Auspumpen der Lampen geschieht nicht mehr mit Quecksilberluftpumpen, sondern im großen mit Maschinenluftpumpen. Das Besondere dieser Luftpumpen besteht darin, daß der schädliche Raum durch eine zweite Luftpumpe ausgepumpt wird, ehe der Hub des Hauptkolbens beginnt. Auf diese Weise würden, elektrotechnisch gesprochen, zwei Luftpumpen hintereinandergeschaltet sein. Genügt nicht die zweifache Hintereinanderschaltung von Luftpumpen, so werden sie mehrfach hintereinandergeschaltet. Ein einzelner Luftpumpenzylinder läßt einen Verdünnungsgrad zu, der durch den Quotienten aus dem Volumen des schädlichen Raumes und dem Gesamtvolumen bestimmt ist. Bei hintereinandergeschalteten Pumpenzylindern sind die Einzelquotienten zu multiplizieren, und dadurch kommt man sehr bald zu brauchbaren Werten für das Vakuum.

Als absoluten Druck im Vakuum verlangt man etwa 0,2 mm Quecksilbersäule. Mit den Maschinenluftpumpen werden viele Lampen (mehrere hundert) auf einmal ausgepumpt, die in Gruppen mit den Rohrleitungen der Luftpumpe verbunden werden.

Gegen Ende des Auspumpens werden die Lampen an ihre Betriebsspannung angeschlossen. Dadurch erwärmen sich die Glaswände, und so wird die Luft, die sich dicht an der inneren Glasoberfläche aufhält, zum größten Teile frei und mit ausgepumpt. Die Erwärmung des Glases wird durch Asbesttüten, die man über jede Lampe stülpt, begünstigt.

Die Anbringung des Sockels erfolgt in jedem Fall erst nach dem Abschmelzen.

Das Vakuum hat nicht allein die Verbrennung der Kohle zu verhindern, es hat auch noch eine zweite Aufgabe: Würde ein beliebiges Gas in der Birne vorhanden sein, so würde dadurch ein beträchtlicher Teil der von der Faser auftretenden Wärme fortgeleitet werden. Das Vakuum trägt zur Leitung der Wärme überhaupt nicht bei, es wirkt wie eine ideale Wärmeschutzmasse. Von der Wärmeleitung ist zu unterscheiden die Wärmestrahlung, die auch durch das Vakuum hindurch erfolgt. Die durch Strahlung übergehende Wärmemenge ist aber sehr gering gegen die durch ein schlechtes Vakuum fortgeleitete Wärmemenge. Ein gutes Vakuum hält daher die Wärme an der Faser zusammen, und es ist die Folge des Wärmesparens die, daß eine Lampe mit gutem Vakuum geringere Leistungszufuhr braucht, um eine bestimmte Lichtstärke abzugeben, als eine schlecht ausgepumpte Lampe.

Ein schlechtes Vakuum erkennt man nach dem Gesagten leicht daran, daß eine Lampe auffällig heiß wird, wenn sie an normaler Spannung liegt. Auch die Beschaffenheit des Glases kann von Einfluß auf die äußere Temperatur sein.

Die häufigst vorkommenden Spannungen, für die Kohleglühlampen hergestellt werden, sind 110 und 220 Volt. Die normale Lichtstärke beträgt 16 Kerzen, der normale Leistungsverbrauch der 16 kerzigen Lampe in der Nähe von 100 Volt 50 Watt, in der Nähe von 200 Volt 65 Watt; demnach würde eine normale 100-Voltlampe 0,5 Ampere beanspruchen. Als oberste Grenze der Lichtstärke bei Verwendung von Kohleglühlampen sind etwa 100 Kerzen anzusehen. Die Kohleglühlampe eignet sich am besten für Anlagen in der Nähe von 100 Volt und gleich gut für Wechsel- und Gleichstrom.

Die Gebrauchstemperatur der Kohlefaser beläuft sich etwa auf 2000 Grad.*

Kohleglühlampen zeigen nach längerem Gebrauch eine Lichtabnahme, die nach etwa 600 Brennstunden ein Auswechseln der Lampen gegen neue erforderlich macht, wenn man mit möglichst wenig Kosten möglichst viel Licht haben will.

Für die Maße der Edison- und Bajonettsockel der Lampen sind durch den Verband deutscher Elektrotechniker Normalien aufgestellt worden.

Die stromführenden Teile der Fassungen werden auf Porzellan befestigt und dürfen nicht an der Außenseite liegen. Die äußere Umgebung der Fassung besteht gewöhnlich aus Messing, das direkt oder mit Hilfe von Nippeln an die Beleuchtungskörper geschraubt wird. Die in den Rohren der Wandarme, Deckenpendel und Kronen liegenden Fassungsadern werden bei der Herstellung dieser Beleuchtungskörper eingezogen.

§ 47. Die Nernstlampe. (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.)

Die Nernstlampe benutzt einen Leuchtkörper zu seinen Hauptbestandteilen aus Magnesiumoxyd und Yttriumoxyd. Das Material ist in kaltem Zustande Nichtleiter, in warmem Zustande, etwa von der Rotglut ab, und bei Weißglut ist es Stromleiter zweiter Klasse. Es verträgt sehr hohe Temperaturen. Bei der Gebrauchstemperatur ist sein spezifischer Widerstand (Ohm auf m und qmm) ungefähr 2500; es erklärt sich aus dieser gegen Kohle hohen Zahl, daß der Leuchtkörper die Form kurzer Stäbchen annimmt. Die Lampe bedarf zu ihrer Zündung einer Anheizvorrichtung, die bei den in den Handel kommenden Lampen aus einer Heizspirale besteht: ein elektrischer Strom durchfließt in der Nähe des Leuchtkörpers eine feine Metallspirale die auf einem aus schwer schmelzenden Oxyden bestehenden Stäbchen aufgewickelt und durch Oxydüberzüge geschützt ist. Im

* Absolut, d. h. von — 273 Grad Celsius aus gemessen.

Kreise der Heizspirale befindet sich ein kleiner selbsttätiger Unterbrecher, der die Heizspirale vermöge eines mit dem Leuchtkörper hintereinandergeschalteten Elektromagneten stromlos macht, sobald der Leuchtkörper Strom führt.

Um die Lampe gegen Spannungsschwankungen unempfindlicher zu machen, ist dem Leuchtkörper ein Widerstand aus Eisen, der Schutzwiderstand, vorgeschaltet, dessen feine Spiralen in einem mit verdünntem Wasserstoff versehenen Glaszylinder untergebracht sind. Bei stärker werdendem Strome erwärmt sich das Eisen bedeutend, vergrößert seinen Widerstand und verhindert daher, daß der Strom bei mäßigen Spannungserhöhungen in unzulässigem Maße zunimmt. Nach diesen Angaben wird das Schema der Lampe, Fig. 138, verständlich. Der Schutzwiderstand verbraucht normal 10 bis 15 % der vorhandenen Netzspannung.

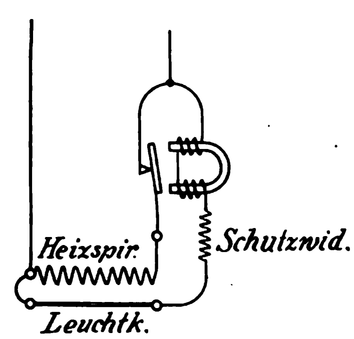


Fig. 138. Schema der Nernstlampe.

Die Nernstlampe wird hergestellt für Spannungen von etwa 100 bis zu 300 Volt und für die Stromstärken 0,25, 0,5 und 1 Ampere. Sie eignet sich am besten für Anlagen in der Nähe von 200 Volt und infolge des Umstandes, daß der Leuchtkörper elektrolytischer Leiter ist, besser für Wechselstrom, als für Gleichstrom. Bei Gleichstromlampen wird durch geeignete Zusammensetzung des Leuchtkörpers dafür gesorgt, daß die chemische Wirkung nicht störend hervortritt, und es ist daher darauf zu achten, daß die Lampenpole nicht entgegen der Angabe angeschlossen werden. Die Nernstlampe arbeitet ohne Vakuum. Kleinere Nernstlampen (Modell B) werden mit Sockeln für normale Fassungen geliefert, größere (Modell A) haben andere Aufhängung.

§ 48. Die Tantallampe. (Siemens & Halske.)

Tantal, ein etwa bei 2300 Grad (abs.) schmelzendes seltenes Metall, ist erst durch die Arbeiten im Siemensschen Laboratorium in seinen besonderen Eigenschaften bekannt geworden. Es ist von Farbe dunkler als Platin, sein spezifisches Gewicht beträgt 16,8, sein spezifischer Widerstand bei 15 Grad 0,165; seine Zerreißfestigkeit 9300 kg/qcm. Es wird aus Tantalkaliumdoppelfluorid zu metallischem Pulver reduziert. Die Schmelzung dieses Pulvers im elektrischen Vakuumofen ergibt reines zusammenhängendes Metall von der Härte des weichen Stahles, das durch seine große Zähigkeit auffällt. Es läßt sich hämmern, walzen und ziehen und bekommt durch wiederholtes Hämmern und Glühen eine Härte nahe der des Diamanten, ohne seine Zähigkeit zu verlieren. Der Tantalfaden normaler Lampen hat 0,05 mm Durchmesser, 65 cm Länge und ein Gewicht von 0,22 g. Die normale Lampe arbeitet mit

110 Volt und 0,35 Ampere und gibt dabei 25 Hefnerkerzen. Außerdem werden auch 16-kerzige Lampen hergestellt. Der Faden befindet sich in einer luftleeren, normalerweise mit Edisonsockel ausgerüsteten Birne, die in beliebiger Stellung gebraucht werden kann. Der Faden ist in der Lampe mit Hilfe eines Halters aus Glas und Metalldrähten entlang eines Zylindermantels auf und ab geführt.

Wegen der großen Festigkeit des Tantals lassen sich neue Lampen gut und sicher transportieren. Nach langer Brennzeit nimmt die Festigkeit ab, und das Metall ändert dann, wenn sich der Faden teilt, bei ruhender Lampe kaum seine Lage. Es genügt dann meistens ein geschicktes leises Anstoßen oder Drehen und Wenden der unter Spannung stehenden Lampe, um die Enden wieder zusammenzuschweißen. Die mittlere Brenndauer der Lampen beträgt 500 Stunden. Das Normale ist die Verwendung für Gleichstrom. Wechselstromlampen müssen als solche besonders bestellt werden.

§ 49. Hochwirtschaftliche Glühlampen.

A. Die Osmiumlampe (Deutsche Gasglühlicht-Aktiengesellschaft).

Osmium ist ein schwer schmelzbares Metall der Platingruppe. Seine Schmelztemperatur beträgt ungefähr 2500 Grad, sein spezifisches Gewicht 22,4, sein spezifischer Widerstand bei 15 Grad 0,11, seine Farbe ist hellgrau. Es ist weder durch Feuer noch durch mechanische Mittel bearbeitbar und sehr spröde. Sein Preis ist etwa dreimal so hoch, wie der von Gold und Platin. Es wird gefunden als ständiger Begleiter von Gold und Platin im Ural, in Süd- und Nordamerika (Oregon), in Australien, auf Borneo und in Japan.

Ein Rückstand, der bei der Lösung des natürlichen Platins in konzentriertem Königswasser bleibt, ist im wesentlichen eine Legierung Osmium-Iridium (etwa $1^1/_2{}^0/_0$ des Rohplatins ist Osmium). Dieser Rückstand wird durch Erhitzen im Sauerstoffstrom in sich verflüchtigendes und aufzufangendes Osmiumtetroxyd und Iridium gespalten. Osmiumtetroxyd ist eine heftig riechende und ätzende Verbindung, die dem Metall (ὀσμή, Geruch) seinen Namen gegeben hat. Aus Osmiumtetroxyd ist das Metall durch beliebige Reduktionsmittel (in Wasserstoff) schon bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen in leichter Weise in Staubform zu erhalten.

Das Osmium feinster Verteilung wird gemischt mit organischen sirupösen Bindemitteln und durch Öffnungen zu Fäden gepreßt, getrocknet und unter Luftabschluß geglüht zwecks Überführung des Bindemittels in Kohle. Nun folgt die Formation. Man versteht darunter ein Verfahren, bei dem in einer Wasserdampf und geeignete reduzierende Gase enthaltenden Atmosphäre die Fäden durch einen elektrischen Strom erhitzt werden und nach dem Wassergasvorgang:

$$C + H_2O = CO + 2H$$

die Kohle abgeben. Dieser noch poröse Faden wird in die durch

Lichtbogen geschmolzenen Enden des Platindrahtes gesteckt und in eine Glasbirne eingeschlossen, aus der alle Luft entfernt wird. Die ersten 400 Brennstunden der Lampe lassen den Faden zusammensintern, und so gibt er als massiver Osmiumleiter die beste Lichtausbeute.

Wegen des geringen spezifischen Widerstandes des Osmiums und der schwierigen Herstellung dünnerer Fäden wurden die Osmiumlampen normal für 37 und 40 Volt in den Handel gebracht, so daß sie bei ∽110 und 120 Volt zu drei gleichen Lampen hintereinandergeschaltet werden mußten. Die Hintereinanderschaltung hat den Nachteil, daß eine größere Anzahl von Lampen brennen muß, auch wenn nur eine gebraucht wird, und daß eine Unterbrechung im Kreise (Lockern einer Lampe in der Fassung) mehrere Lampen versagen läßt. Dieser Übelstand hat zu folgenden neueren Lampen geführt:

B. Die Osramlampe (Deutsche Gasglühlicht-Aktiengesellschaft).

Größeren spezifischen Widerstand als Osmium hat eine Legierung, die bei den als Osramlampen bezeichneten Glühlampen verwendet wird. Das Verfahren der Herstellung der Fäden ist im wesentlichen das unter *A* genannte.

C. Die Wolframlampe (Bayerische Glühfädenfabrik, Augsburg).

Aus durch Wasserstoff zu Metall reduzierbaren Verbindungen (Oxyden, Chloriden, Sulfiden) des Wolframs in Pulverform wird mit kohlenstoffreiem Bindemittel eine plastische Masse hergestellt, zu Fäden gepreßt und in Wasserstoffatmosphäre bis zur erfolgten Reduktion erhitzt (Verfahren von A. Just).

D. Die Sirius-Kolloïd-Lampe (Julius Pintsch A.-G., Berlin).

Schwer schmelzbare Metalle (Molybdän, Wolfram) werden durch Lichtbogen unter Wasser kolloïdal gelöst. Der aus dieser Lösung gebildete Niederschlag, das Metall in kolloïdalem Zusammenhang, wird in Fadenform gepreßt und durch hohe Hitze in den kristallinischen Zusammenhang übergeführt (Verfahren von H. Kuzel).

Der Fortschritt, der unter *B*, *C* und *D* genannten Lampen gegen die Osmiumlampe besteht in der bedeutend erhöhten Lichtausbeute und in der Möglichkeit, bei Hintereinanderschaltung mehrerer Fäden in einer Birne Lampen von 100 bis 130 Volt für direkte Parallelschaltung herzustellen. In der Nähe von 200 Volt werden zwei gleiche Lampen hintereinandergeschaltet. Normale Lichtstärken dieser Lampen sind 32, 50 und 100 Hefnerkerzen.

Sämtliche Lampen dieses Paragraphen arbeiten mit Luftleere. Sie brennen an normaler, auf dem Sockel angegebener Spannung über 1000 Stunden ohne wesentliche Lichtabnahme. Sie eignen sich ohne Unterschied gleich gut für Wechsel- und Gleichstrom. Sie werden mit allen gebräuchlichen, normalerweise aber mit Edisonsockeln geliefert. Da der Faden bei der Gebrauchstemperatur weich wird, dürfen die

Lampen nur in senkrecht hängender Stellung installiert werden. Der Transport und die Behandlung der Lampen hat der großen Sprödigkeit der Fäden wegen vorsichtig zu erfolgen.

§ 50. Besondere Schaltungen von Glühlampen.

A. Die Wechselschaltung (Fig. 139).

Zwei räumlich auseinanderliegende Schalter *A* und *B* sind ihrem Wesen nach Umschalter, d. h. sie haben keine Unterbrecherstellung, legen vielmehr die am Drehpunkt angreifenden Drähte entweder an die

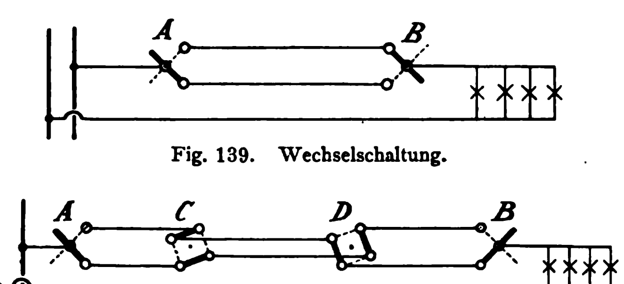


Fig. 139. Wechselschaltung.

Fig. 140. Treppenschaltung.

eine oder an die andere von zwei zwischen ihnen liegenden Verbindungsleitungen. Die Schalter dieser Art heißen Wechselschalter. Schematisch deutet in Fig. 139 die ausgezogene und die gerissene Linie die Ruhestellungen der Drehstücke an. Es ist an jeder der beiden Stellen von *A* und *B* aus möglich, die Lampen ein- und auszuschalten.

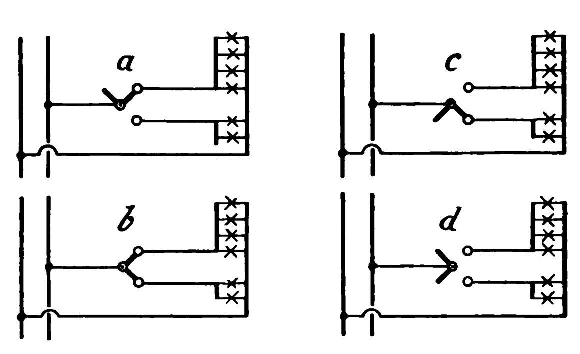


Fig. 141. Gruppenschaltung.

B. Die Treppenschaltung (Fig. 140).

In die Verbindungsleitung zwischen den Wechselschaltern (bei *A* und *B*) sind an beliebig vielen Stellen (bei *C* und *D*) Schalter angebracht, die durch ihre Drehung die beiden Leitungen gegeneinander umschalten. Diese Schalter heißen Kreuzschalter und ermöglichen die Einschaltung der Lampen auch von *C* und *D* aus. Die eine der möglichen Stellungen bei *C* und *D* ist ausgezogen, die andere gerissen gezeichnet.

C. Die Gruppenschaltung (Fig. 141.)

Ein Ausschalter besitzt ein Winkelstück, das in die vier durch *a* bis *d* gekennzeichneten Stellungen gebracht werden kann. Er heißt (Serienschalter) Gruppenschalter; er dient dazu, Lampengruppen verschiedener Anzahl einzeln oder zusammen anzuschließen, und gewährt außerdem eine Unterbrechung (Stellung *d*). Ist der Schalter nach zwei Richtungen drehbar, so ist seine Handhabung bequemer.

II. Die Bogenlampen (vgl. § 17, I; § 19, 5; § 22, 4).

§ 51. Die Kohlen und der Lichtbogen.

Die Kohlenstifte der Bogenlampen haben als Ausgangsmaterial vorwiegend Retortenkohle und Petrolkoks, die fein gepulvert, gereinigt und mit geeigneten Zusätzen und sirupösen Bindemitteln zu einem Teig angerührt und in Stabform gepreßt werden. Durch Glühen unter Luftabschluß wird das Bindemittel in Kohle übergeführt.

Außer diesen gewöhnlichen, grundsätzlich aus reiner Kohle bestehenden Stäben, die „weißes" Licht abgeben, werden auch Kohlen mit besonderen Leuchtzusätzen (getränkte Kohlen, Effektkohlen) hergestellt, die „gefärbtes" Licht zeigen. Bei dem häufigst vorkommenden „gelb gefärbten" Licht, ist das Kalzium die färbende Substanz, das durch Flußspat (Kalziumfluorid, $CaFl_2$) unter Zusatz von Borax der Kohle zugeführt wird.

Eine zusammen mit anderen Lichtern leicht bläulich erscheinende weiße Färbung erhält man durch Tränkung mit Baryum, die für Schaufensterbeleuchtung („weiß gefärbtes" Licht) beliebt ist. Rote Färbung gibt Strontium.

Als eine mittlere für Bogenlampen geeignete Spannung am Lichtbogen gelten bei Gleichstrom 40 Volt für Lampen mit „offenem" Lichtbogen. Die Grenzen für diesen Fall sind etwa 36 und 45 Volt. Für offene Wechselstromlampen rechnet man etwa 30 Volt. Höhere Voltzahlen führen eine unangenehme violette Färbung und weniger günstige Lichtausbeute herbei. Normale Stromstärken für Bogenlampen sind 6 bis 10 Ampere, als Grenzen kommen (abgesehen von Scheinwerfern) etwa 1,5 bis 35 Ampere in Frage.

Als „offene" Lichtbogen werden solche mit Zutritt der normalen Luft bezeichnet. Schließt man den Lichtbogen luftdicht oder nahezu luftdicht ein (Innenglas), so verzehrt der Lichtbogen bald den etwa vorhandenen Sauerstoff und brennt im sauerstoffarmen Raume weiter. In diesem Falle werden die Kohlen bedeutend langsamer verbrannt, und die Spannung am Lichtbogen kann für Beleuchtungszwecke bis etwa 80 Volt, für photographische Zwecke auf den doppelten Wert mit Vorteil gesteigert werden. Der Gedanke führt zu den Dauerbrand- oder Sparlampen. Die Kohlen brennen nicht mehr spitz und kraterförmig, sondern an beiden Polen flach ab. Der Lichtbogen erscheint als

schwachleuchtende, stark bewegte Kugel. Offene Bogenlampen werden für 8 bis 16 Stunden Brenndauer eingerichtet, während geschlossene Bogenlampen bis zu 200 Brennstunden für ein Stiftepaar erreichen.

Ein offener 40-Volt-Lichtbogen hat bei ungetränkten Kohlen und mittleren Lampenströmen nur wenige mm Länge. Weiß- und gelbgefärbte Lichtbogen hingegen brennen bei gleichen Spannungen mit bedeutend längerem Bogen, etwa 8 bis 12 mm, so daß mit schräg stehenden Kohlen beide Angriffsstellen des Lichtbogens bei geeigneter Anordnung ihr Licht nach unten werfen. Ein Blasmagnet* verhindert das Aufsteigen des Lichtbogens.

Man beobachtet bei langen Lichtbogen, daß Stickstoff und Sauerstoff der Luft miteinander Verbindungen eingehen (N_2O_2 farbloses Stickstoffdioxyd, sowie höhere Oxyde, die als braune Dämpfe sichtbar werden). Verbindungen dieser Art geben stechenden Geruch und sind gesundheitsschädlich. Lampen mit getränkten Kohlen, oder langem Lichtbogen überhaupt, sind daher ohne weiteres für Innenräume mit geringem Luftabzug nicht geeignet, können hingegen mit besonderen Mitteln dazu geeignet gemacht werden (Gebr. Siemens & Co., Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft u. a.).

Der Hauptausgangspunkt des Lichtes ist für gewöhnliche „weiße" offene und geschlossene Lichtbogen seine Angriffstelle an der Positivkohle, während die negative schwächer, der Lichtbogen selbst aber nur verschwindend zur Lichtabgabe beiträgt. Bei weiß- und gelbgefärbtem Bogenlicht leuchtet der Lichtbogen bedeutend mit. Sowohl gefärbte wie auch eingeschlossene Lichtbogen eignen sich für Wechselstrom ebensogut, wie für Gleichstrom, während die offene Wechselstromlampe ohne Tränkung der Kohlen der offenen Gleichstromlampe nachsteht.

Bei offenen Gleichstromlampen gewöhnlicher Kohlenstellung gibt man der Oberkohle stets den größeren Querschnitt. Die normale Anordnung, daß der Pluspol zur Hauptlichtabgabe nach unten an der Oberkohle liegt, führt dazu, in gleichen Zeiten gleiche Strecken der Kohlen abbrennen zu lassen, wodurch der Querschnitt der Oberkohle etwa 9 : 4 der Unterkohle wird.

Aber auch für die indirekte Beleuchtung, bei der zweckmäßig der Lichtstrom nach oben geworfen wird, und die daher die Unterkohle als die positive erfordert, hat sich herausgestellt, daß am besten die Oberkohle dicker als die Unterkohle gewählt wird. Kleine Teilchen von Ausschwitzungen der Kohle, im wesentlichen Quarzteilchen, fallen vom Rande der Oberkohle ab und würden, wenn sie durch den Lichtbogen fielen, helles Aufleuchten, also unruhiges Licht verursachen. Bei dickerer Oberkohle fallen sie außerhalb des Lichtbogens. Daher gilt für indirekte Beleuchtung: kurze dicke negative Oberkohle, lange dünnere positive Unterkohle!

---

* Vgl. Kraftwirkung zwischen Strom und Feld, § 67, 8. Versuch.

Schließlich sind noch zu unterscheiden die Dochtkohlen und die Homogenkohlen. Die Dochtkohlen enthalten im Innern konzentrisch zur Achse einen Teil aus lockerem Kohlematerial. Wird eine Dochtkohle als positive Oberkohle, eine Homogenkohle als negative Unterkohle verwendet, so brennt die Unterkohle mit einer auffällig schlanken Spitze, während die obere Angriffstelle des Lichtbogens im wesentlichen die Form eines Ringes bekommt, da das innere, lockere Material eine starke Höhlung der Oberkohle verursacht. Auf diese Weise wird der Schattenkegel der Unterkohle geringer, das Licht bekommt eine gleichmäßigere Verteilung nach unten. Der hier beschriebene Fall ist der normale für offene Gleichstromlampen. Bei Wechselstrom verwendet man gewöhnlich zwei gleich starke Homogenkohlen.

§ 52. Der Charakter der Bogenlampen als Hauptschluß-, Nebenschluß- und Differentiallampe.

Die weitaus häufigste Anordnung für den Nachschub der Kohlen ist die, daß die Oberkohle an einem Gewicht befestigt ist, das an einer Kette hängend die Triebkraft für den Mechanismus abgibt. Die Kette ist über eine kleine Kettennuß gelegt und greift mit dem zweiten Ende an einer Traverse an, die die Unterkohle führt. Die Achse der Kettennuß bewegt ein durch mehrere Räderübersetzungen zu höheren Geschwindigkeiten führendes Werk, dessen letzte Achse ein Flügelrad besitzt. Die Gegeneinanderbewegung der Kohlen erfolgt dadurch langsam. Diese Anordnung hat mit Kohlen, die in gleichen Zeiten um gleiche Stücke abbrennen, den Erfolg, daß der Lichtbogen sich stets an derselben Stelle befindet.

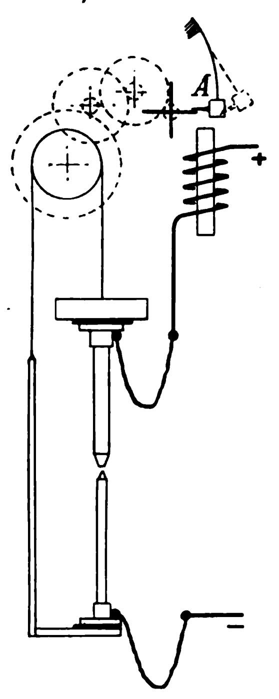


Fig. 142. Schema der Hauptschlußlampe.

A. Die Hauptschlußlampe.

Denken wir eine Anordnung nach Fig. 142 in Verbindung mit einem Elektromagneten, dessen Windungen vom Strom der Lampe durchflossen sind, also Lichtbogen und Spule in Hintereinanderschaltung. Ein Anker dieses Elektromagneten wird vom Strom der Lampe angezogen und greift dabei in das Flügelrad ein, wodurch das Laufwerk festgehalten ist. Der Lichtbogen brennt so bei festgehaltenen Kohlen. Mit dem Abbrennen der Kohlen wird der Strom der Lampe schwächer, zugleich auch der Magnetismus, und der Anker wird dabei langsam durch seine Feder zurückgezogen, die in der gerissen gezeichneten Stellung entspannt sein möge. Bei einer bestimmten Stromstärke wird aber das Werk durch den

zurückgehenden Anker freigegeben, die Kohlen bewegen sich etwas gegeneinander, der Strom steigt dadurch wieder, und der Anker hält nun für einige Zeit das Laufwerk wieder fest, bis der bestimmte Geringstwert des Stromes wieder erreicht ist.

Eine so eingerichtete Lampe heißt Hauptschlußlampe und regelt unabhängig von der Lichtbogenspannung auf Strom. Die dem Lichtbogen zukommende Spannung wird durch einen Vorschaltwiderstand etwa nach Art der Fig. 124 geregelt, indem für den Lichtbogen die Differenz aus der Netzspannung und der am Vorschaltwiderstand liegenden Spannung übrigbleibt.

Hauptschlußlampen können nicht hintereinandergeschaltet werden, da der Strom in hintereinandergeschalteten Teilen notwendigerweise in jedem Augenblick den gleichen Wert hat, während jede Lampe ihr eigenes Spiel mit dem Strome beansprucht.

B. Die Nebenschlußlampe.

Bei der Hintereinanderschaltung von Lampen führt zunächst der Gedanke etwas mehr zum Ziele, die Spannung durch den Regelungsmechanismus zu teilen. Man kommt somit zur Nebenschlußlampe, deren Erläuterung eine Vorbemerkung erfordert:

Der Strom, der von konstanter Netzspannung aus bezogen wird, durchfließt in Hintereinanderschaltung die Bogenlampe und einen Widerstand konstanter Ohmzahl, so wie es Fig. 143 andeutet. Dieser Widerstand

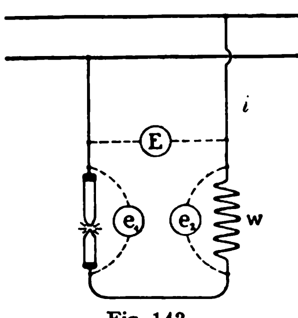


Fig. 143.

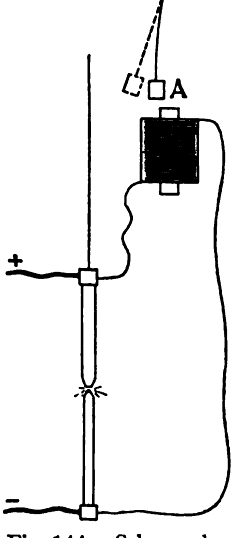


Fig. 144. Schema der Nebenschlußlampe.

habe zusammen mit der Leitung die Ohmzahl w; die Netzspannung heiße E, der im Bogenlampenkreise fließende Strom i. Bei feststehenden Kohlen geht i während des Abbrennens von größeren zu geringeren Werten über; die Spannung e_2, die w verbraucht, ist dem Strome proportional, nämlich

$$e_2 = i \cdot w,$$

so daß bei geringerem Strome auch e_2 im gleichen Maße geringer wird. Geringer werdendes e_2 hat aber bei konstanter Netzspannung eine größer werdende Spannung e_1 an der Lampe zur Folge:

$$e_1 = E - e_2 = E - i \cdot w;$$

wird also eine Lampe so hergestellt, daß sie an einem bestimmten Höchstwert der Lampenspannung auslöst, so ist dadurch ebenfalls eine Regulierung möglich. Es wird nach dem Schema der Fig. 144 eine Magnetspule mit vielen dünnen Windungen, die dadurch großen Widerstand hat und schwachen Strom führt, dem Lichtbogen parallelgeschaltet. Durch die große Zahl der Windungen wird der Magnetismus auch bei schwachem Strome genügend stark. Nunmehr ist aber der Anker so angeordnet, daß er links vom Magneten seine Ruhelage hat, wenn die Lage der Teile im übrigen entsprechend der Fig. 142 gedacht wird. Auch hier beschreibt der Anker während des Abbrennens der Kohlen einen Weg von links nach rechts und gibt bei einer bestimmten Stelle das Laufwerk frei. Die darauf folgende Näherung der Kohlen bewirkt eine Zunahme der Stromstärke, die auch eine Spannungsverringerung an der Lampe und somit ein Zurückfedern des Ankers und erneutes Festhalten des Laufwerkes zur Folge hat.

Die Lampe mit Nebenschlußspule hat immer noch nicht vollkommene Freiheit der Regelung in Hintereinanderschaltung, da der Strom, der die hintereinandergeschalteten Lampen durchfließt, bestimmend ist für die Spannungsänderung. Daß die Hintereinanderschaltung von Nebenschlußlampen möglich ist, liegt an den besonderen Widerstandsverhältnissen des Lichtbogens, der gegen feste Widerstände ein abweichendes Verhalten zeigt. Eine von zwei Lampen mag auslösen, während die andere ihr Werk festhält. Der Regelungsvorgang der ersten bringt eine Stromsteigerung auch in der zweiten hervor. Wäre der Lichtbogen der zweiten Lampe ein fester Widerstand, so würde auch an der zweiten Lampe die Spannung proportional zum Strome steigen. Die Regelung der ersten Lampe würde dann sofort eine Auslösung der zweiten zur Folge haben, also die Hintereinanderschaltung ginge nicht. Nun aber ändert der Lichtbogen bei feststehenden Kohlen durch eine Stromsteigerung in den hier vorkommenden Grenzen seine Spannung sehr wenig (eine Stromsteigerung gibt eine geringe Spannungsabnahme), und daher erleidet die nicht regulierende Lampe durch die regulierende keine wesentliche Störung. Nebenschlußlampen schaltet man mit einem Vorschaltwiderstand, der etwa 30 bis 35 $^0/_0$ der Netzspannung verbraucht, zu zweien hintereinander.

C. Die Differentiallampe.

Hintereinanderschaltung in beliebiger Anzahl gewähren die Differentiallampen, bei denen sich zugleich eine Stromspule und eine Spannungsspule nach dem Schema der Fig. 145 vorfindet. Ist die

Ruhelage des Ankers A in der Mitte zwischen den Polen zugleich die Auslösestellung, so wie es in der Figur gezeichnet sein soll, so brauchen beide magnetische Kräfte nur gleich groß zu sein, damit die Lampe auslöst. Nehmen wir, was nahezu gerechnet werden kann, an, daß die magnetischen Kräfte den Strömen proportional sind, so heißt das: Die Lampe löst aus, wenn ein bestimmtes Verhältnis von Lampenspannung zu Lampenstrom erreicht ist, oder, was dasselbe heißt, sie

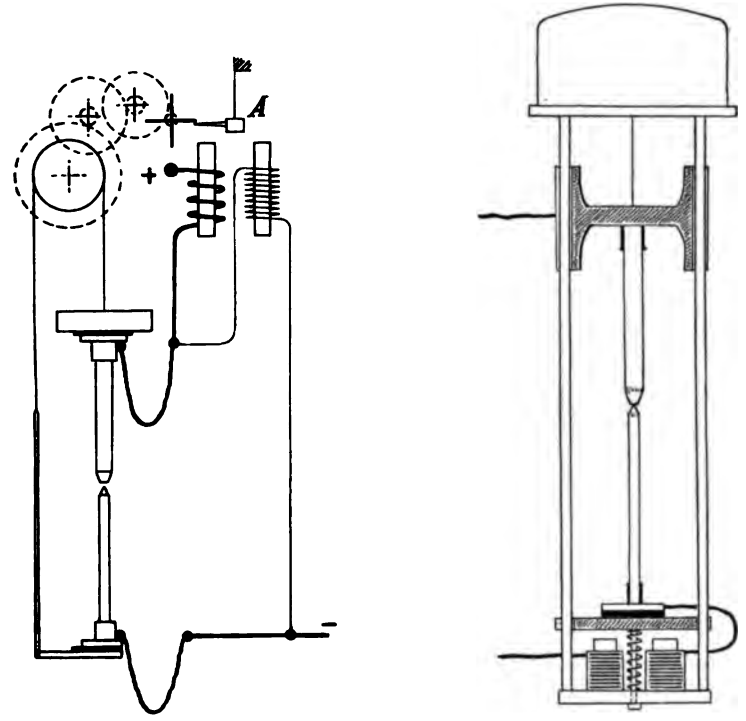


Fig. 145. Schema der Differentiallampe. Fig. 146. Bogenbilder.

regelt jedesmal bei einem bestimmten Widerstande des Lichtbogens. Dieses Verhalten ist wichtig, weil bei Hintereinanderschaltung mehrerer Lampen nun ein besonderer Vorschaltwiderstand entbehrt werden kann, denn für die gerade auslösende Lampe bilden die übrigen Lampen des Kreises den Vorschaltwiderstand.

D. Der Bogenbilder.

Liegt den Lampen ohne weiteres der bisher gedachte Mechanismus zugrunde, so ist noch für die Möglichkeit des ersten Anzündens der Lampe, der Bildung des Lichtbogens, zu sorgen. Die Hauptschlußlampe rückt im Zustande der Stromlosigkeit die Kohlen auf-

einander, die Nebenschlußlampe hält sie bei Ausschaltung mit einem Luftabstand fest, die Differentiallampe kann in diesem Punkt verschieden eingerichtet sein. Ein Anschließen der Nebenschluß- und der Differentiallampe führt ebenfalls die Kohlen aufeinander ohne für das erste Zustandekommen des Bogens zu sorgen. Hier wendet man einen Bogenbilder an. Man versteht darunter einen in Fig. 146 schematisch dargestellten Elektromagneten, der außer den zur Regelung dienenden Spulen vorhanden ist, und durch dessen Windungen der Strom des Lichtbogens fließt. Der Magnet wirkt gewöhnlich auf die untere Kohle ein, indem er im Augenblick der ersten Berührung beider Kohlen vermöge des dadurch entstehenden Stromstoßes seinen Anker und mit ihm die Unterkohle einige Millimeter schnell nach unten zieht. Der Anker bleibt angezogen, so lange die Lampe brennt. Bei dem Ausschalten der Lampe schnellt der Anker des Bogenbilders durch Federkraft um die genannte kleine Strecke zurück. Die nach unten wirkende Kraft der Oberkohle ist geringer als die Kraft der Feder, daher setzt sich die Oberkohle auf, ohne die Unterkohle aus ihrer erhöhten Lage zu verdrängen. Einige von dem bisher erläuterten Regelungsverfahren abweichende Anordnungen werden im folgenden Teil behandelt.

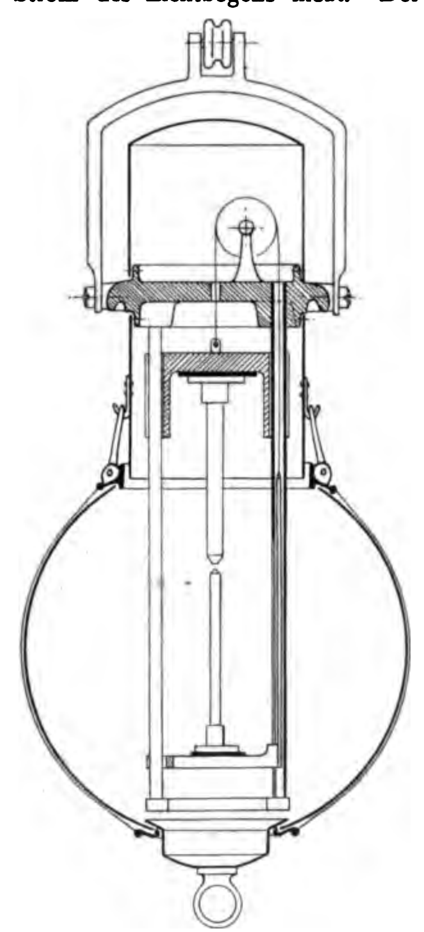


Fig. 147. Normale mechanische Anordnung.

§ 53. Ausführungsformen von Bogenlampen.

A. Normale mechanische Anordnung bei offenem Lichtbogen.

Bei den häufigst vorkommenden Lampen mit offenem Lichtbogen ordnet man ohne Rücksicht auf Einzelheiten nach folgenden Grundsätzen an, wozu Fig. 147 die Veranschaulichung geben mag:

Eine Fundamentplatte aus Gußeisen trennt den Raum des Regelwerkes von dem des Lichtbogens. An dem Fundament greift äußerlich der Bügel an, der vermittelst eines isolierenden Teiles (Por-

zellanrolle) die Lampe trägt. Auf dem Fundament sitzt die das Regelwerk schützende Haube. An dem Fundament befestigt sind zwei nach unten sich erstreckende Rohre, die Bogenlampenrohre, die aus Messing hergestellt zur Führung der Kohlen dienen. Die Oberkohle sitzt isoliert an dem mit Führungsteilen versehenen Gewicht. Die beide Kohlen tragende Kette geht über die Kettennuß hinweg durch eines der Bogenlampenrohre zu einem Stab, der im Rohrinnern die Traverse der Unterkohle geradeführt. Ein Schlitz im Bogenlampenrohr gestattet dieser Traverse genügende Bewegung. Eine Gabel am anderen Ende dieser Traverse gleitet am zweiten Rohr, um die Führung der Unterkohle vollständig zu machen. Beide Rohre sind unten fest verbunden.

Die Höhlung des zweiten Bogenlampenrohres dient zur Rückführung des Stromes von der ebenfalls isoliert aufgesetzten Unterkohle zum oberen Teil der Lampe. Beide Kohlen werden von festen Punkten aus mit beweglichen Kupferseilen, die durch Glasperlen isoliert sind, mit Strom versorgt.

Zur Erzielung genügend langer Brennzeit (8 bis 16 Stunden) müssen die Kohlen genügend lang sein, und durch sie wird im wesentlichen die Länge der Lampe beeinflußt. Um unter Anwendung langer Kohlen nicht zu unbequem großen Glocken zu kommen, schließt man an die Fundamentplatte äußerlich einen aus Blech hergestellten Verlängerungszylinder an. An ihm hängt die Glocke mittels Haken und Ösen. Die Glocke besitzt einen oberen und einen unteren Metallring, an dem die Einbindung angreift. An dem oberen Ring sind die Aufhängeösen befestigt. Ein Ascheteller aus Metall am unteren Teil der Glocke nimmt herabfallende glühende Teilchen auf.

Zwei am oberen Ring der Glocke und am Verlängerungszylinder befestigte Ketten halten die Glocke beim Einsetzen der Kohlen und beim Reinigen der Lampe.

B. Pendelnd aufgehängte Laufwerke.

Man vermeidet Bogenbildermagnete durch Anwendung pendelnd aufgehängter Laufwerke. Ein Beispiel hierfür gibt die Nebenschlußlampe von Körting & Mathiesen, Fig. 148, zu deren Erläuterung die Skizze Fig. 149 gehört. Das Laufwerk pendelt um eine Achse zwischen den beiden senkrechten Teilen der Kette (in Fig. 149 der Einfachheit halber um die Achse der Kettennuß). Der pendelnde Teil trägt oben den Weicheisenanker A und wird durch eine Feder f zurückgezogen gegen die Zugkraft des Magneten. Das mitpendelnde Flügelrad F liegt auf einem festen Anschlag a und verhindert bei zurückgezogenem Räderwerk eine Drehung der Räder. Dreht sich die durch das Flügelrad festgehaltene Kettennuß mit dem pendelnden Werk, so wird durch die Pendelung eine Bewegung der Kohlen von- und zueinander hervorgerufen.

Erst im letzten Teil der Pendelung, wobei der Anker sich nahe den Magnetpolen befindet, fällt das Flügelrad ab.

Stehen die Kohlen anfänglich auseinander, so liegt die nahezu volle Spannung an der Lampe, denn der Vorschaltwiderstand verbraucht bei dem geringen Nebenschlußstrom so gut wie keine Spannung. Es fließt ein Nebenschlußstrom durch die Spule, der größer ist als der nor-

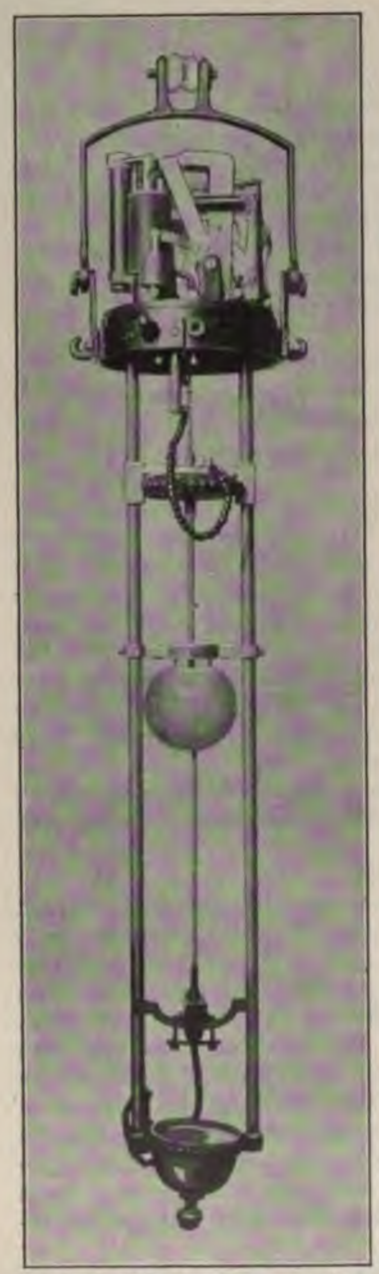


Fig. 148. Nebenschlußlampe für 2 Ampere von Körting & Mathiesen.

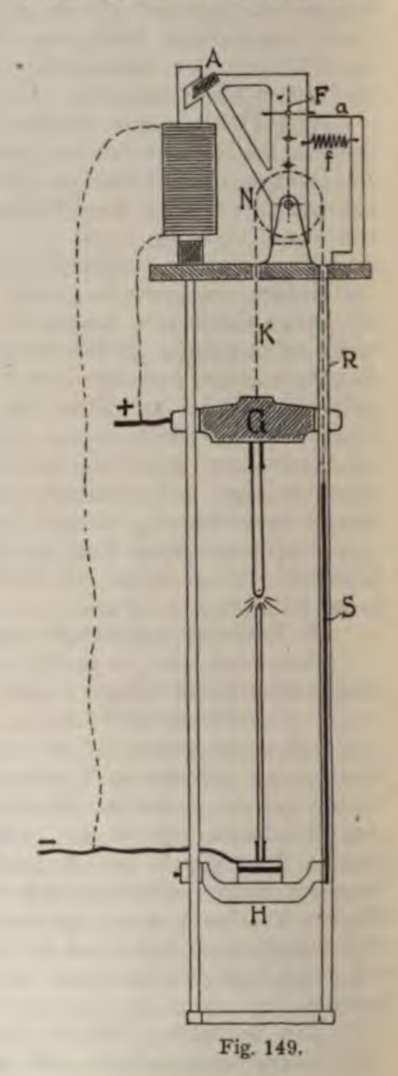


Fig. 149.

male, und der Anker wird fest angezogen; das Flügelrad wird frei und die Kohlen bewegen sich bis zur Berührung aufeinander. Nun folgt ein starker Stromstoß, die Spannung an der Lampe sinkt, der Anker wird losgelassen und die Feder f zieht das Pendelwerk bis zu einem Anschlag zurück, wodurch sich die Kohlen eine kurze Strecke auseinanderbewegen. Der Lichtbogen ist somit gebildet und von nun ab geht die Regelung ähnlich dem Vorgange von § 52 B vor sich. Zur Dämpfung der Bewegungen benutzt diese, wie die meisten übrigen Lampen, eine Luftbremse.

Die Hebellängen vom Pendeldrehpunkt zu den senkrechten Teilen der Kette verhalten sich entsprechend den Kohlegewichten (9 zu 4) wie 4 zu 9, um die Regelung von der jeweiligen Kohlenlänge unabhängig zu machen. Ein Kompensator beseitigt die Verschiedenheiten der Lampenspannung, die ohne ihn durch verschiedene Temperaturen der Magnetspulen vorhanden sein würden. Die in Fig. 148 abgebildete Lampe soll ohne größere Glocke verwendet werden. Infolge des schwachen Stromes der Lampe von 2 Ampere werden sehr dünne Kohlen gebraucht, die nahe dem Lichtbogen nochmals einer Führung bedürfen.

Mit pendelndem Werk arbeiten auch Differentiallampen einer ganzen Reihe von Firmen. Dabei befinden sich häufig Eisenkerne zu beiden Seiten eines zweiarmigen Hebels, von denen der eine in die Hauptschluß-, der andere in die Nebenschlußspule gezogen wird. Die Bewegung dieses Hebels vermittelt die Pendelung des Werkes.

C. Die Differentiallampe Schuckert-Krizik.

Zur Erläuterung dient das Schema Fig. 150. Oben an der Lampe befindet sich eine Scheibe S, in deren Nut eine Schnur gelegt ist. Die Scheibe hat an ihrem Umfang sehr feine Zähne, so daß eine Verdrehung in der Figur nur im Sinne des Uhrzeigers möglich ist. An der Schnur hängt auf jeder Seite ein kegelförmiger Eisenkern. Durch die Kegelform ist das Verhältnis der magnetischen Kräfte innerhalb der vorkommenden Stellungen bei unverändertem Haupt- und Nebenschlußstrom nahezu unveränderlich. Weiter unten schließen sich die Kohlen an, deren Führungen hier fortgelassen sind. Beide Kohlen mit den zugehörigen Eisenkernen sind ungefähr im Gleichgewicht. Um den Eisenkern der unteren Kohle fließt der Hauptstrom, um den der oberen Kohle der Nebenschlußstrom.

Stehen die Kohlen zunächst auseinander und schließt man die Lampe an, so ist die Wirkung der Hauptstromspule sehr gering, dagegen wird der Eisenkern E_1 der Nebenschlußspule kräftig gezogen, bis sich die Kohlen berühren. Bei dieser Bewegung dreht sich die Scheibe S. Von dem Augenblick ab, wo der starke Strom fließt, wird auch der Eisenkern E_2 in seine Spule gezogen, die Schnur gleitet auf der Rolle und die Kohlen werden ein Stück auseinander gebracht zur Bildung des Lichtbogens. Nimmt nun bei dem Verbrennen der Kohlen die Spannung zwischen ihnen zu, so überwiegt der Einfluß der Neben-

schlußspule. Sie zieht den Eisenkern E_1 allmählich in sich herein und nähert dadurch die Kohlen gegenseitig entsprechend dem Abbrand.

Die Lampe wird dadurch auf bestimmte Spannung geregelt, daß man das Gewicht der einen oder der anderen Seite des beweglichen Teiles durch kleine Auflegegewichte verändert. Es wirkt dann außer der magnetischen Kraft auch die Schwerkraft. Die Lampen werden so hergestellt, daß das Gewicht der Kohlen verhältnißmäsig wenig ausmacht.

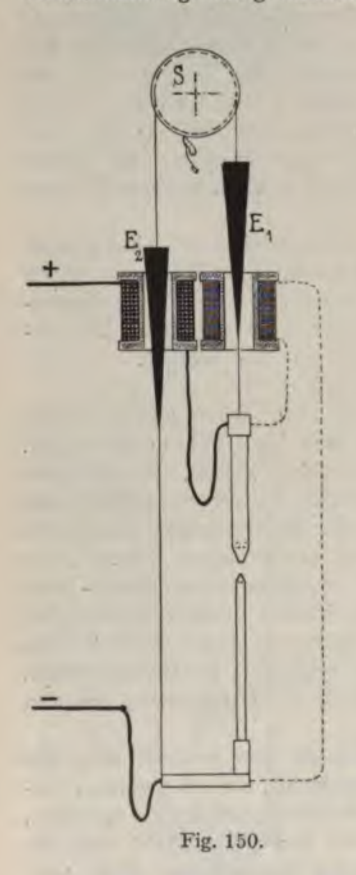


Fig. 150.

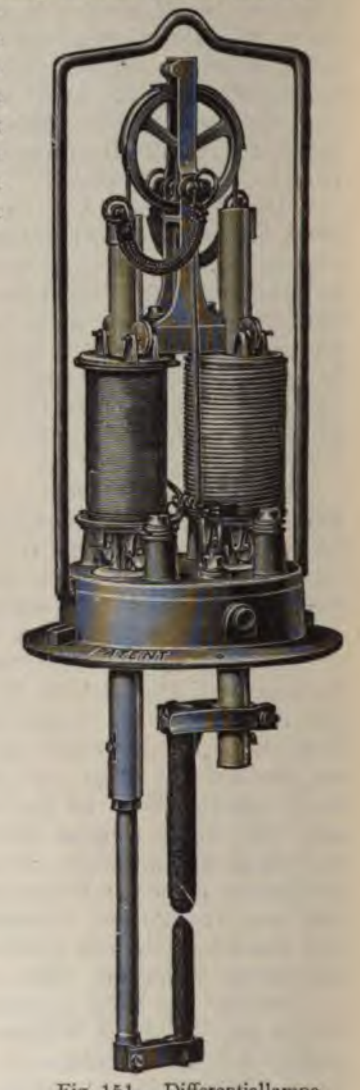


Fig. 151. Differentiallampe Schuckert-Krizik.

Eine Ausführungsform der Lampe gibt Fig. 151. Die kegelförmigen Eisenkerne sind in Messingrohren untergebracht, welche den beiden Kohlenhaltern zugleich die nötige Führung geben. Gegen Fig. 147 sind hier die Eisenkerne mit der Spitze nach oben gekehrt, wodurch

die Lager der oberen Rolle vom magnetischen Zug entlastet werden. Die Änderung hat zur Folge, daß die Oberkohle am Eisenkern der Hauptschluß-, die Unterkohle an dem der Nebenschlußspule befestigt sein muß.

Die Lampe baut sich lang, hat aber den Vorteil vollständiger Geräuschlosigkeit beim Nachschub der Kohlen.

D. Lampen mit Klemmvorrichtungen.

Durch die Verwendung von Dauerbrandbogenlampen, die als Hauptschlußlampen von 110 Volt aus einzeln brennen, hat sich eine Reihe von Lampenkonstruktionen entwickelt, die auf einfache Weise die Regelung und Nachstellung ermöglichen, wozu Fig. 152 die Erläuterung geben mag.

Ein Eisenkern enthält eine Bohrung, durch die die Oberkohle geführt ist. Den Eisenkern umgibt eine Magnetspule, die äußerlich zur Vergrößerung der magnetischen Kräfte mit Eisen umgeben ist. An den Eisenkern schließt sich nach unten ein rohrförmiger Teil, der am unteren Ende eine Klemmvorrichtung zum Festhalten der Oberkohle trägt. Setzt sich die Klemmvorrichtung auf, so wird die Oberkohle frei und fällt. Bei Stromlosigkeit fällt sie bis auf die Unterkohle. Beim Anschluß der Lampe hebt sich zunächst der Eisenkern ein Stück ohne die Kohle festzuhalten, bis die Klemmvorrichtung ansetzt, und erst im zweiten Teil des Hubes nimmt er die Kohle um ein Stück mit. Dadurch ist der Lichtbogen gebildet und von nun ab tragen die magnetischen Kräfte das ganze bewegliche System des Eisenkernes mit der Kohle. Der Eisenkern hebt sich, bis der Strom zu der Stärke vermindert ist, daß Schwerkraft und magnetische Kraft einander gleich sind. Brennen die Kohlen ab, so senkt sich durch den langsam schwächer werdenden Strom das bewegliche System, bis die Klemmvorrichtung aufsetzt; die Oberkohle schlüpft ein kleines Stück nach unten, denn bei geringer gegenseitiger Näherung der Kohlen wird die Stromstärke vergrößert und der Eisenkern sofort wieder nach oben gezogen.

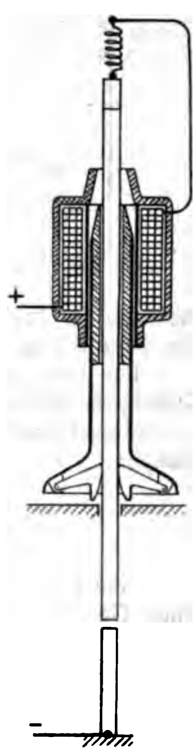


Fig. 152. Anordnung mit Klemmvorrichtung.

Nach diesem System arbeiten die Jandus-, die Regina-, die Siemens-Schuckertsche Liliput- und andere Dauerbrandlampen.

§ 54. Schaltungen von Bogenlampen.

A. Die einfache Parallelschaltung.

Die einfache Parallelschaltung von Gleichstrom- Bogenlampen nach dem Schema der Fig. 153 ist bei offenem Lichtbogen zweckmäßig nur

von $E = 65$ Volt aus, bei geschlossenem Lichtbogen zweckmäßig nur von $E = 110$ oder 120 Volt aus vorzunehmen.* Sind die Netzspannungen höher, so wird es nötig, zu viel Spannung im Vorschaltwiderstand zu vernichten. Die im § 52 B angegebenen $e_2 = 30$ bis $35\,^0/_0$ vernichtet man zu Regulierungszwecken ohne Bedenken, da die Licht-

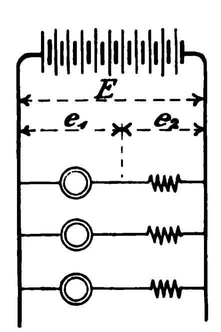




Fig. 153. Einzelschaltung.

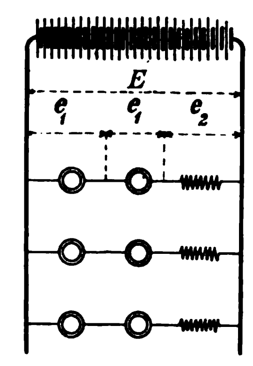


Fig. 154. Zweischaltung.

ausbeute bei Bogenlampen wesentlich günstiger ist, als bei Glühlampen, wie § 60 zeigen wird.

Für diese Schaltung sind Hauptschluß-, Nebenschluß- und Differentiallampen verwendbar.

Man braucht für den elektrischen Teil jedes Kreises außer der Lampe:

1 zweipoligen Ausschalter
1 zweipolige Sicherung
1 Bogenlampenwiderstand.

Eine Anzahl Lampen (z) von bestimmter Stromstärke (i) beansprucht einen Gesamtstrom

$$I = z \cdot i.$$

B. Die Hintereinanderschaltung von 2 Lampen.

Die Hintereinanderschaltung von zwei Gleichstromlampen nach dem Schema der Fig. 154 ist bei offenem Lichtbogen zweckmäßig von $E = 110$ oder 120 Volt, bei geschlossenem von $E = 220$ Volt aus. Es wird dann für

$E = 110$ Volt:
$e_1 = 38$ bis 40 Volt
$e_2 = 34$ bis 30 Volt.
$E = 120$ Volt:
$e_1 = 40$ bis 45 Volt
$e_2 = 40$ bis 30 Volt.

* Für photographische Zwecke bei Dauerbrandlampen auch von 220 Volt aus.

$E = 220$ Volt:

$e_1 = 75$ bis 80 Volt

$e_2 = 70$ bis 60 Volt.

Anwendbar sind für diese Schaltung Nebenschluß- und Differentiallampen. Man braucht für den elektrischen Teil jedes Kreises außer den Lampen:

1 zweipoligen Ausschalter
1 zweipolige Sicherung
1 Bogenlampenwiderstand.

Es beanspruchen z Lampen von i Ampere einen Gesamtstrom

$$I = \frac{z \cdot i}{2},$$

wobei z eine gerade Zahl sein muß.

C. Die Hintereinanderschaltung von 3 Lampen.

Die Hintereinanderschaltung von drei Gleichstromlampen nach dem Schema der Fig. 155 geschieht bei offenem Lichtbogen von $E = 110$ und 120 Volt aus; es wird dann für

$E = 110$ Volt:	$E = 120$ Volt:
$e_1 = 36$ Volt	$e_1 = 39$ Volt
$e_2 = 2$ Volt (Leitungsverlust).	$e_2 = 3$ Volt (Leitungsverlust).

Anwendbar sind für diese Schaltung nur Differentiallampen. Man braucht für den elektrischen Teil jedes Kreises außer den Lampen:

1 zweipoligen Ausschalter
1 zweipolige Sicherung
1 Bogenlampen-Anlaßwiderstand
1 Minimalautomaten.

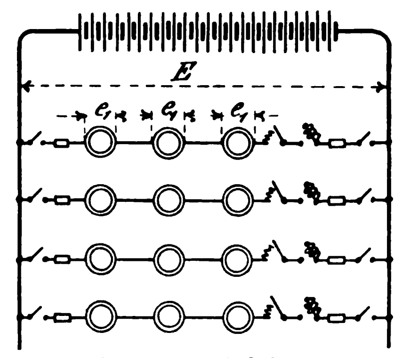


Fig. 155. Dreischaltung.

Der Bogenlampen-Anlaßwiderstand besteht aus einem Kurbelwiderstand mit 5 bis 8 Kontakten in geeigneten Widerstandsstufen. Er hat den Zweck, beim Anschalten der Lampen ein Schwirren der Kohlen (vgl. Wagnerschen Hammer) zu vermeiden. Die Kurbel wird langsam, dem Angehen der Lampen folgend, bis zum Kurzschlußkontakt bewegt und bleibt, solange die Lampen in Betrieb sind, auf diesem Kontakt stehen.

Der Minimalautomat wird nötig im Falle, daß eine Lampe eine Unterbrechung des Lichtbogenstromes verursacht, etwa durch eine Klemmung am Nachstellmechanismus, durch Ausbrennen der Kohlen oder durch andere Zufälligkeiten. Die übrigen Differentiallampen des

Kreises bringen in diesem Falle die Kohlen aufeinander. Es würde dann die versagende Lampe die ganze Betriebsspannung an ihrer Nebenschlußspule haben, der Nebenschluß führt den dreifachen Strom, entwickelt die neunfache Wärme in der Sekunde und schlägt schließlich durch; die Spule verbrennt. Man verhütet diese Störungen durch Anbringen des Minimalautomaten in dem Kreise.

Die Hintereinanderschaltung von Bogenlampen hat den Nachteil, den die Hintereinanderschaltung überhaupt hat, daß bei einer Stromunterbrechung im Kreise alle Lampen des Kreises verdunkeln. Man verteilt daher gern mehrere Kreise räumlich über das gleiche Gebiet, um nicht ganze Räume in diesem Fall ins Dunkle zu setzen. Der andere Nachteil besteht darin, das hintereinander geschaltete Lampen stets zusammen brennen müssen, was bisweilen verschwenderisch sein kann.

Es beanspruchen z Lampen von i Ampere in dieser Schaltung einen Gesamtstrom

$$I = \frac{z \cdot i}{3},$$

wobei $z/3$ eine ganze Zahl sein muß.

D. Die Hintereinanderschaltung beliebig vieler Lampen.

Die Hintereinanderschaltung von Differentiallampen gleicher Stromstärke kann beliebig vorgenommen werden unter Einhaltung der Bedingung, daß die Summe der Lampenspannungen gleich der Netzspannung oder etwas geringer ist. Hierher gehören die häufiger vorkommenden Fälle der Hintereinanderschaltung von 6 offenen Gleichstrom-Bogenlampen an 220 Volt oder von 12 an 500 Volt. Man kommt hier mit dem unter C angegebenen System mit Minimalautomat aus, hingegen treten die Nachteile der Hintereinanderschaltung, wenn viele Lampen auf einen Kreis kommen, noch empfindlicher hervor, indem eine versagende Lampe möglicherweise eine ganze Anlage ins Dunkle setzen würde. Hier schaffen selbsttätige Bogenlampen-Ersatzwiderstände Abhilfe, wobei der Minimalautomat fortfällt. Die Wirkung der Ersatzwiderstände veranschaulicht Fig. 156.

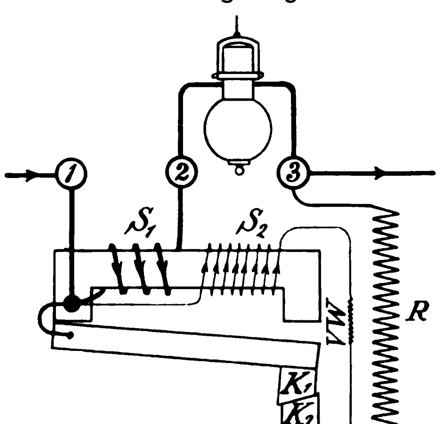


Fig. 156. Selbsttätiger Bogenlampen-Ersatzwiderstand.

Der Strom kommt von der vorherigen Lampe in der Figur von links zu Klemme 1 des Apparates, geht von hier zum Eisen eines Elektromagneten und durch eine Spule aus wenig dicken Windungen (S_1)

zu Klemme 2, von da zur Lampe nach Klemme 3 und schließlich von da aus zur nächsten Lampe, die dieselbe Einrichtung besitzt. Die Spule S_2 besteht aus vielen dünnen Windungen und besitzt einen Vorschaltwiderstand VW von ebenfalls größerer Ohmzahl. Die Spule S_2 ist in Hintereinanderschaltung mit VW und einem Widerstande R von geringerer Ohmzahl parallel zur Bogenlampe (zwischen Klemmen 1 und 3) geschaltet. Eine zweite Möglichkeit für den Lauf des Hauptstromes ist gegeben von der Klemme 1 aus durch den Anker des Elektromagneten, den Kohlekontakt $K_1 K_2$ und durch R zur Klemme 3. R hat eine Ohmzahl gleich derjenigen, auf die die Lampe regelt (4 Ohm bei 40 Volt und 10 Ampere).

Die Spulen S_1 und S_2 führen bei brennender Lampe gleichzeitig Strom in einander entgegengesetztem Sinn um das Eisen. Ihre Windungszahlen sind so bemessen, daß die Wirkung von S_1 normalerweise überwiegt gegen S_2; der Anker ist daher angezogen und der Stromlauf durch R zwischen K_1 und K_2 unterbrochen. Bekommt nun die Lampe eine Klemmung oder brennen ihre Kohlestifte aus, so steigt die Spannung an der Lampe. Die Wirkung der feindrähtigen Spule wird größer und steigt bis zu dem Wert, bei dem die Wirkung der dickdrähtigen Spule aufgehoben wird. In diesem Fall ist der Magnetismus Null, der Anker fällt ab, der Kontakt $K_1 K_2$ wird geschlossen, die Lampe erlischt und der Strom wird über R geführt. Das geschieht alles ohne Störung der übrigen Lampen des Kreises. Zugleich mit der Lampe wird auch die Spule S_1 und S_2 stromlos; S_1, weil sie mit der Lampe hintereinandergeschaltet ist, S_2, weil sie nun nur zum Kohlekontakt parallel geschaltet ist, an dem sich gegen ihre Betriebsspannung nur eine verschwindende Voltzahl aufhält; der Anker bleibt also in seiner tieferen Lage, solange die Lampe versagt. Sollte dagegen eine Zufälligkeit (ein Windstoß, eine Erschütterung der Lampe) das Versagen beseitigen, so bewegen sich die Kohlen wieder aufeinander, der erste Stromstoß durch S_1 zieht den Anker wieder an und stellt die frühere Schaltung wieder her.

Selbsttätige Ersatzwiderstände werden entweder in leicht zugänglicher Höhe oder in der Nähe der Lampe, etwa über dem Regelwerk, angebracht. Sie verteuern die Anlage um etwa 30 bis 50 % des Preises der Lampen.

F. Wechselstromschaltungen.

Wenn die Lampen für Wechselstrom eingerichtet sind (Kohlen gleicher Dicke, Regelung auf 30 Volt bei gewöhnlichen Kohlen und offenem Lichtbogen, aufgeschlitzte Spulenhülsen und unterteilte Magnetkerne), so können für Wechselstromlampen ohne weiteres die bisher angegebenen Schaltungen mit sinngemäß veränderten Voltzahlen angewandt werden. An Stelle des Vorschaltwiderstandes kann hier eine Drosselspule* treten, wodurch an Stromkosten gespart wird. Wechselstrom läßt Transformation zu und gestattet daher mittels kleiner Bogen-

* Vgl. Selbstinduktion bei Wechselstrom § 116 A.

lampentransformatoren auch die Speisung einzelner Lampen dem Prinzip nach von beliebig hoher Spannung aus.

Hier sind in bezug auf Parallel- und Reihenschaltung der Transformatoren und der Lampen viele Möglichkeiten vorhanden, die nach Erledigung des Wechselstromes* von selbst verständlich werden.

§ 55. Der mechanische Teil für die Aufhängung von Bogenlampen.

Da Bogenlampen eine Bedienung beanspruchen durch das Einsetzen von Kohlestäben und durch das Reinigen, müssen sie leicht zugänglich sein. Der Fall, daß man mit Leitern zu ihnen steigt, ist seltener. Das Normale ist, die Bogenlampen zur Bediennng herabzulassen. Man hängt sie an verbleites Flußeisenseil, das als Bogenlampenseil in den Handel kommt; das Seil wird über Bogenlampenrollen zu einer Bogenlampenwinde geführt.

Die Zuleitungsdrähte zur Lampe werden häufig beweglich angeordnet; der bewegliche Teil beginnt etwa in der Mitte zwischen der höchsten und tiefsten Stellung der Lampe; die Drähte besitzen Durchhang, so daß sie in keiner Stellung das Gewicht der Lampe zu tragen haben. Diese Anordnung hat den Vorteil, daß die Lampe mit neu eingesetzten Kohlen geprüft werden kann, solange die Lampe sich unten befindet, dagegen den Nachteil, daß bei ausgebrannten Kohlen und bei Vergessen des Ausschaltens vor dem Neueinsetzen von Stiften dem Arbeiter leicht die Hand mit Brandwunden verletzt wird. Man hat dabei außerdem den Nachteil der beweglichen Leitungen überhaupt, die leicht verletzlich und bisweilen hinderlich sind.

Fest verlegte Leitungen bis zur Lampe hin gestatten die Bogenlampen-Leitungskupplungen, die aus einem lösbaren Kontakt bestehen und zum einen Teile über der Lampe am letzten Rollbock befestigt, zum anderen Teile zusammen mit der Lampe herablaßbar sind. Das Bogenlampenseil ist durch die Achse der Kupplung hindurchgeführt. Hier herrschen zwei Grundsätze: Der eine verwendet gewöhnliche Federkontakte, wobei die Lampe durch eine geeignete Führung vor ihrer höchsten Stellung in eine bestimmte, zu den Kontakten passende Lage gedreht wird (Siemens-Schuckertwerke). Der andere benutzt konzentrische Kontakte, so daß die Lampe in jeder Stellung in die Kontakte gezogen werden kann (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft; C. A. Schaefer, Hannover, u. a.). Bogenlampen-Leitungskupplungen verlangen Bogenlampenwinden mit nicht zu großer Sperrzahnteilung.

Besondere Anordnungen des mechanischen Teiles sind je nach den äußeren Umständen verschieden. Im Freien verwendet man Maste oder Querdrähte. Letztere verlangen bei Gegenwart von Straßenbahnen die Möglichkeit einer wagerechten und einer senkrechten Bewegung der Lampe.

---

* Siehe 14. Kapitel § 118.

III. Messungen an Lichtquellen.

§ 56. Das einfache Photometrieren.

Unter dem Photometrieren versteht man den Vergleich zweier Lichtstärken, von denen die eine bekannt ist. Die Einheit der Lichtstärke ist die in der wagerechten Ebene des Lichtes der Hefnerlampe Hist. 50) auftretende Lichtstärke bei ruhigstehender, in reiner atmosphärischer Luft frei brennender Flamme, die aus dem Querschnitt eines massiven, mit Amylacetat gesättigten Dochtes aufsteigt, der ein kreisrundes Dochtröhrchen aus Neusilber von 8 mm innerem und 8,3 mm äußerem Durchmesser und 25 mm freistehender Länge vollkommen ausfüllt, bei einer Flammenhöhe von 40 mm vom Rande des Dochtröhrchens aus und wenigstens 10 Minuten nach dem Anzünden gemessen. Vor Festlegung dieser Einheit, die als Hefnerkerze (1 HK) bezeichnet wird, gab es mehrere weniger genau bestimmte, die mit der Hefnerkerze etwa folgende Beziehung haben:

1 deutsche Vereinsparaffinkerze (NK)	(50 mm Flammenhöhe)	= 1,162 bis 1,2 HK,
1 Münchener Stearinkerze . . .	(52 mm „	= 1,21 „ ,
1 englische Walratkerze	(44,5 mm „	= 1,138 bis 1,4 „ ,
1 französische Dezimalkerze . . .		= 1,13 „ .

Zum Photometrieren stellt man die Lichteinheit J_1 (Fig. 157) auf die eine Seite einer Photometerbank, die zu untersuchende Lampe mit der Lichtstärke J_2 auf die andere Seite in einer Entfernung mehrerer

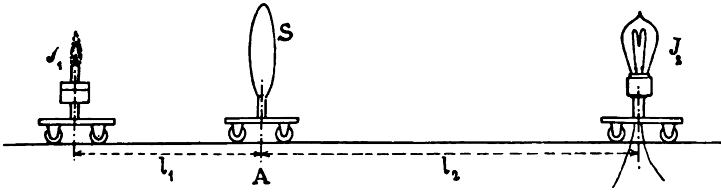


Fig. 157. Photometerbank.

Meter. Zwischen beiden Lichtquellen befindet sich ein Photometerschirm S. Er besteht aus einer beiderseits mattweißen undurchsichtigen Platte, die so eingestellt werden muß, daß sie auf beiden Seiten gleich hell erscheint. In diesem Falle herrscht auf beiden Seiten des Schirmes die gleiche Beleuchtung. Sei A diese Stelle, so verhalten sich die Lichtstärken wie die Quadrate der zugehörigen Entfernungen vom Photometerschirm:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2}, \text{ oder es ist } J_2 = J_1 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2};$$

somit wird die Lichtstärke J_2 gewonnen.

Eine optische Einrichtung nach Fig. 158 gestattet es zur Ermöglichung des Vergleichens beider Seiten die zwei Flächen des Schirmes nebeneinander zu sehen. Das durch zwei gleiche Spiegel gebrochene

Licht geht entsprechend den angegebenen Strahlen durch zwei Prismen aus gleichem Glase, die zum Teil mit Kanadabalsam aufeinandergeklebt, zum Teil durch dünne Luftschichten voneinander getrennt sind. An Stellen ersterer Art geht der Lichtstrahl wie durch eine einzige Glasmasse normal zu den Begrenzungsflächen geradlinig durch, an den abgehobenen Stellen dagegen tritt vollständige Spiegelung ein. Die Wege beider Strahlen im Glas sind gleich lang, so daß die Schwächung der Lichtstrahlen durch das Glas für die beiden Seiten des Schirmes die gleiche ist. Eine Doppelmessung mit Umlegung des Photometers beseitigt etwaige Fehler. Dieses von Lummer und Brodhun herrührende Photometer gibt bei geübtem Auge scharfe Werte und hat daher den Vorzug gegen das ältere von Bunsen[Hist 37]) herrührende Fettfleckphotometer.

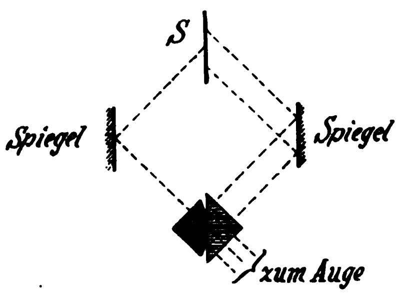


Fig. 158. Schema zum Photometer von Lummer und Brodhun.

Unter der Beleuchtung E einer normal zum Lichtstrahl stehenden Fläche verstehen wir den Quotienten aus der Lichtstärke J (in HK) und dem Quadrat der Entfernung der Fläche von der Lichtquelle aus (in m); bei eingestelltem Photometer ist daher:

$$E = \frac{J_1}{l_1^2} = \frac{J_2}{l_2^2};$$

die so gewonnene Beleuchtung E wird ausgedrückt in Lux; ein Lux ist somit erklärt als die Beleuchtung einer normal zum Lichtstrahl stehenden Fläche in 1 m wagerechtem Abstand von 1 HK.

Nur eine leuchtende Kugel würde nach allen Richtungen im Raume gleichmäßige Lichtstärke zeigen. Wenn keine weiteren Einflüsse zu berücksichtigen sind, erklärt schon die verschiedene Größe der Projektion eines beliebigen Leuchtkörpers von verschiedenen Richtungen aus diese Verschiedenheiten.

Man photometriert in Räumen, die nicht Licht auf den Photometerschirm reflektieren (mattschwarz oder dunkelrot gestrichene Zimmerwände ohne glänzende Teile zu beiden Seiten des Photometerschirmes) und in denen außer den beiden gebrauchten Lichtern sonst alles verdunkelt ist. Blenden aus schwarzem Sammet dienen zum Abfangen störender Lichtstrahlen.

§ 57. Die mittlere räumliche (sphärische) Lichtstärke.

Denkt man sich um einen beliebigen Leuchtkörper eine Kugel beschrieben, in deren Mittelpunkt der Leuchtkörper liegt, und denkt man sich weiter diese Kugel in eine Anzahl gleich großer Flächen-

elemente geteilt, so wird man nach jeder Richtung vom Leuchtkörper aus zu den einzelnen Flächenteilen hin photometrieren können. Ist der Leuchtkörper selbst von einer Kugel verschieden, so wird jede dieser Lichtstärken einen anderen Wert haben. Addiert man diese Lichtstärken und dividiert man sie durch die Zahl der Flächenteile, so erhält man das, was unter der mittleren räumlichen Lichtstärke zu verstehen ist.

Eine Messung dieser Art ist praktisch schwer ausführbar und es gibt daher zum Photometrieren von Glühlampen Annäherungsverfahren, die schneller zum Ziele führen.

Eine Glühlampe mag senkrecht aufgestellt sein mit der Spitze nach oben. Der Kreis, der entsteht, wenn eine wagerechte Ebene durch den Schwerpunkt des Leuchtkörpers die um ihn gedachte Kugel schneidet, heißt der Äquator, die senkrechten durch die Achse der Lampe gehenden Ebenen schneiden die gedachte Kugel in Meridiankreise.

Man photometriert die Lampe zunächst in der oben angegebenen Stellung entlang des halben Äquators, indem man sie von Messung zu Messung um einen bestimmten in 180° aufgehenden Winkel weiterdreht. Aus den so gewonnenen Werten bildet man das arithmetische Mittel, das mit J_{hm}, der mittleren horizontalen Lichtstärke bezeichnet sein möge.

Nun läßt man die Lampe auf einem der untersuchten Punkte stehen und dreht sie um eine dazu normale wagerechte Achse, so daß man die Lichtstärken entlang eines Meridianes bekommt. Auch hier photometriert man vom oberen bis zum unteren Pol unter jedesmaliger Weiterdrehung um einen in 180° aufgehenden Winkel.

Nun hat dieses Verfahren die Voraussetzung, daß entlang eines jeden Meridianes die Lichtstärken sich in demselben Maße zu der äquatorialen verändern, wie an dem gemessenen Meridian. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, müssen mehrere Meridiane gemessen werden. Man bildet die mittlere Lichtstärke des untersuchten Meridianes nach einem zeichnerischen Verfahren entsprechend der Fig. 159, indem man die Bogen auf eine zur Achse parallele Gerade* projiziert und von dieser aus die zugehörigen Lichtstärken aufträgt. Die Ausgleichslinie, die zur einen Seite so viel von der Fläche abschneidet, als nach der anderen Seite zur Vervollständigung

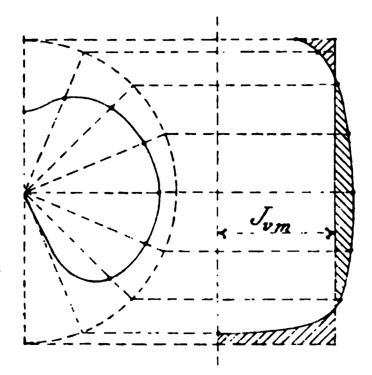


Fig. 159. Lichtverteilung im Meridian einer normalen Kohleglühlampe.

* Kugelzone gleich Zone des Tangentialzylinders.

des Rechteckes fehlt, hat als Abstand die mittlere vertikale Lichtstärke $J_{v\,m}$. Heißt die am Kreuzungspunkt des Äquators und des untersuchten Meridianes auftretende Lichtstärke J, so ist unter obiger Voraussetzung die mittlere räumliche Lichtstärke:

$$J_m = J_{h\,m} \cdot \frac{J_{v\,m}}{J}.$$

Bei Messung mehrerer Meridiane ist aus den verschiedenen Werten J_m das Mittel zu nehmen.

Die mittlere räumliche Lichtstärke einer Lampe ist der Wert, nach dem man das von der Lampe erzeugte Licht zu beurteilen hat; vor allem bei den Bogenlampen sind die nach verschiedenen Richtungen gemessenen Lichtstärken voneinander wesentlich verschieden. Fig. 160 zeigt etwa für einen mittleren Fall die Lichtverteilung über den Gleichstromlichtbogen bei positiver Oberkohle.

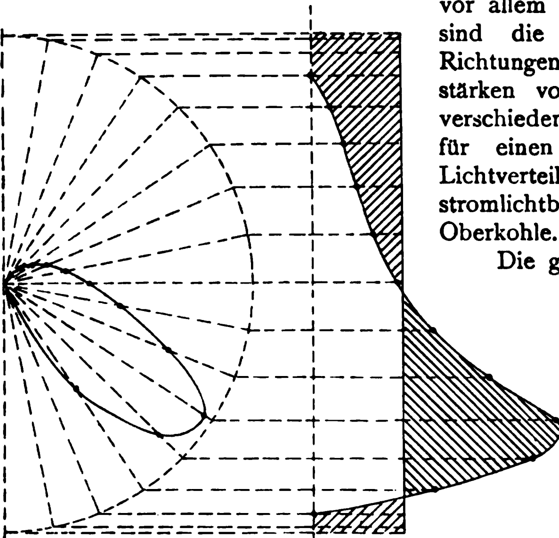


Fig. 160. Lichtverteilung über den Meridian einer normalen Gleichstrom-Bogenlampe.

Die größte Lichtstärke tritt in diesem normalen Falle in der Nähe von 40°, vom Äquator aus gerechnet, auf. Glocken mit Ausnahme von Klarglas wirken verteilend, verringern aber bisweilen auch nicht unwesentlich die mittlere räumliche Lichtstärke.

§ 58. Das Ulbrichtsche Kugelphotometer.

Untersuchungen der in § 57 genannten Art sind zeitraubend und nicht mit allen Lampen ausführbar. Für Bogenlampen liegt die Möglichkeit der Anwendung von Spiegeln vor zur Bestimmung der mittleren meridionalen Lichtstärke, aber Spiegelung schwächt den Lichtstrahl, und den Einfluß des Spiegels zu berücksichtigen bietet weitere Umständlichkeiten.

Die mittlere räumliche Lichtstärke mit nur einer Messung zu bestimmen gestattet das von Ulbricht* herrührende Kugelphotometer. Die

* Elektrot. Zeitschr. 1900, S. 595; 1905 S. 512 u. a.

Lichtquelle wird in eine innen mattweiß gestrichene für Licht undurchlässige Hohlkugel gebracht und wirft ihr Licht auf die Wände, die es zurückwerfen und immer wieder zurückwerfen.

Auf eine Stelle der Kugelwand fallendes direktes Licht beleuchtet jede andere Stelle der Kugel gleichmäßig, da der Einfluß der verschiedenen Flächenabstände durch den der verschiedenen Flächenneigungen aufgehoben wird. Daraus folgt, daß die Beleuchtung der Hohlkugel durch indirektes Licht an allen Stellen die gleiche ist, wie verschieden auch die direkte Verteilung des Lichtes sein mag.

Die Kugel enthält an ihrem Äquatorialkreis eine Mattscheibe M (Fig. 161), die durch eine Blende gegen direktes Licht geschützt ist. Das von M nach außen tretende Licht wird auf der Photometerbank

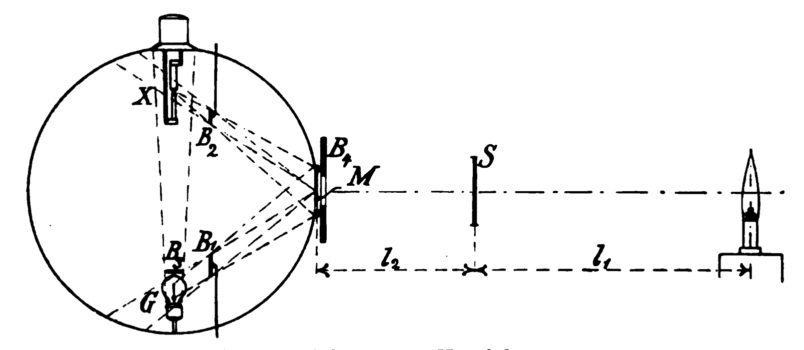


Fig. 161. Schema zum Kugelphotometer.

gemessen. Es handelt sich nun noch darum, die Konstante des Kugelphotometers zu bestimmen. Zu dem Zweck bringt man eine Glühlampe von bekannter mittlerer räumlicher Lichtstärke J_m (vgl. § 57) in die Kugel und photometriert bei ihrem Licht die Mattscheibe, wofür sich der kleinere Wert J'_m ergeben mag. Das Verhältnis $J_m : J'_m$ ist die Konstante K des Kugelphotometers. Heiße die Lichtstärke der Mattscheibe bei dem Licht der unbekannten Lichtquelle J'_x, so erhält man die mittlere sphärische Lichtstärke dieser Lichtquelle selbst zu:

$$J_x = J_m \cdot \frac{J'_x}{J'_m} = K \cdot J'_x .$$

Empfehlenswert ist die Anordnung nach Fig. 161. Die bekannte Glühlampe G und die zu untersuchende Lampe X befinden sich zusammen innerhalb der Kugel. Die Lichtquellen und die Blenden B_1 und B_2 werden so angebracht, daß von M aus gesehen die durch die Blende verdeckte Kugelfläche nicht zu groß und nicht zu hell direkt beleuchtet ist. Eine Blende B_3 schützt das Lampengestell von X gegen direkte Bestrahlung. Sämtliche „Fremdkörper“ in der Kugel, B_1, B_2, B_3 und die (je kleiner, um so besseren) Lampengestelle sind allseitig mattweiß zu streichen. Vor die Mattscheibe M setzt man eine mattschwarze

Blende B_4. Durch Blenden mit verschiedenen Öffnungen erhält man verschiedene Konstanten des Photometers.

§ 59. Das Ausphotometrieren eines Raumes.

Der Zweck der Beleuchtungsanlagen ist bestimmten Flächen bestimmte Beleuchtungen zu geben, wobei unter der Beleuchtung die in § 56 festgelegte und in Lux auszudrückende Größe verstanden wird. Bei dem Ausphotometrieren eines Raumes handelt es sich nun darum, meistens unter Vorhandensein mehrerer Lichtquellen, die an bestimmten Stellen auftretende Beleuchtung durch Versuch zu bestimmen. So z. B. muß sich für einen Zeichensaal von qm zu qm des Grundrisses für eine wagerechte Fläche in Höhe der Zeichentische die Beleuchtung zweckmäßig innerhalb bestimmter Grenzen halten.

Zu Untersuchungen dieser Art bedient man sich zweckmäßig des Photometers von Leonhard Weber nach dem Schema der Fig. 162. Es besteht im wesentlichen aus einem für Licht undurchlässigen, innen mattschwarzen Hohlkörper mit einem wagerechten und einem prismatischen Teil. Der senkrechte Teil ist oben durch eine Mattscheibe M_1 abgeschlossen, auf die das zu untersuchende Licht fällt. Eine zweite Mattscheibe M_2 ist im wagerechten Teil verschiebbar angeordnet. Auf sie fällt das Licht der Vergleichslampe, als die hier zunächst die Hefnerlampe gesetzt sein möge. Durch eine geeignete Einrichtung, in der Abbildung durch das Lummer-Brodhunsche Prismenpaar, können beide Mattscheiben zugleich gesehen werden. Man verschiebt M_2, bis beide Mattscheiben gleich hell erscheinen, mißt die Strecke l_1 in m und bekommt dann die gesuchte Beleuchtung durch den Ausdruck:

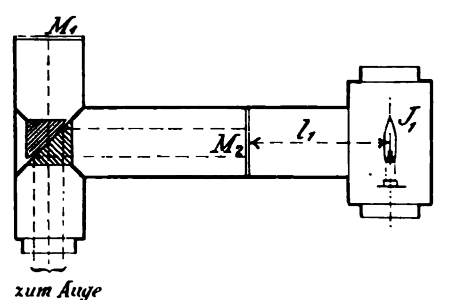


Fig. 162. Schema des L. Weberschen Photometers.

$$E = \frac{J_1}{l_1^2};$$

bei Verwendung eines anderen Vergleichslichtes, z. B. einer photometrierten Glühlampe, bedeutet J_1 ohne weiteres die bekannte Lichtstärke dieser Lampe (in HK). Infolge etwaiger Verschiedenheiten der Mattscheiben usw. kann zu obigem Ausdruck eine Konstante K treten:

$$E = K \cdot \frac{J_1}{l_1^2},$$

deren Bestimmung mit Hilfe einer Lampe bekannter Lichtstärke in bestimmtem Abstande von M_1 erfolgt.

Es beanspruchen:

Zeichenbretter	45 bis 30 Lux
Webstühle, Spinnmaschinen	30 „ 15 „
Schreibtische, Ladentische	20 „ 10 „
Feinere Arbeiten wenigstens	10 Lux
Bahnsteige	3 bis 1 „
Straßen und Plätze	1 „ 0,1 „.

Die Sonne beleuchtet wagerechte Flächen etwa mit 100 Lux, der Mond mit 0,1 Lux. Die geforderten Beleuchtungen liegen zwischen beiden.

§ 60. Vergleich verschiedener Lichtquellen inbezug auf ihre Wirtschaftlichkeit.

Photometriert man eine Reihe verschiedener elektrischer Glühlampen unter Beobachtung von Strom und Spannung, so macht man bei diesen Lampen gemeinsam mit größerer Leistungszufuhr die Beobachtung, daß die Lichtstärke steigt, daß das Licht weißer wird, daß der Wattverbrauch auf die HK abnimmt; Dauerversuche zeigen auch, daß die Lebensdauer der Glühlampe durch die höhere Beanspruchung geringer wird; je größer die Leistungszufuhr zu derselben Lampe, um so höher die Temperatur des Leuchtkörpers.

Das Leuchten der technischen Lichtquellen beruht auf der hohen Temperatur. Das „Temperaturleuchten"* ist nicht zu verwechseln mit dem „Fluoreszenzleuchten", bei dem die Temperatur des Leuchtkörpers eine untergeordnete Rolle spielt. Daß die Technik nach der Vewendung des Temperaturleuchtens am meisten strebt, ist physiologisch schon dadurch erklärlich, daß das natürliche Licht der Sonne ebenfalls auf Temperaturleuchten beruht. Aus dem Licht der Sonne ist die Temperatur ihrer leuchtenden Hülle zu etwa 6000 Grad bestimmt worden, einem Wert, der als die höchste unseren Messungen zugängliche Temperatur anzusehen ist. Diesem Licht hat sich das Auge in der unendlich langen Entwicklungszeit der Lebewesen angepaßt.

Jeder erwärmte Körper sendet eine Strahlung aus, deren Träger, der gleiche, wie der der Elektrizität, als der Lichtäther bezeichnet wird. Die Strahlung nehmen die Individuen zum Teil als Wärme und von etwa 500 Grad ab zum Teil als Licht wahr. Sie ist ein Arbeitsvorgang in mechanischem Sinn, so daß von einem erwärmten Körper eine bestimmte Leistung in Form von Strahlen ausgeht. Die Strahlung beruht auf einem transversalen Schwingungsvorgang des Lichtäthers; jeder erwärmte Körper sendet ein Gemisch von Schwingungen von unendlich vielen Schwingungsdauern und entsprechenden Wellenlängen aus, deren Gesamtheit als die Gesamtstrahlung bezeichnet wird. Nur der geringste Teil dieser Strahlung ist für die von uns herstellbaren Temperaturen

* Vgl. für die folgenden Betrachtungen: Lummer, Die Ziele der Leuchttechnik (R. Oldenbourg, 1903).

mit Lichterscheinungen verbunden. Es sind das die Wellen von etwa 0,4/1000 mm Länge (violett im Spektrum) bis etwa 0,8/1000 mm Länge (rot im Spektrum), also gerade eine Oktave. Für jede der überhaupt vorhandenen Wellenlängen läßt sich die zu ihr gehörige Leistung/qcm messen. Das Maximum dieser Leistung liegt bei den künstlichen Lichtern weit vom Gebiet der mit Licht verbundenen Strahlung zu größeren Wellenlängen hin, während bei dem Licht der Sonne das Maximum der Strahlungsleistung gerade mitten im Gebiet der sichtbaren Strahlung, bei 0,6/1000 mm Wellenlänge (gelbgrün im Spektrum) gemessen wurde. Je heißer der Leuchtkörper ist, um so höher wird das Maximum, um so mehr verschiebt sich das Maximum der Strahlungsleistung zum sichtbaren Teile hin, und um so größer wird der mit Lichterscheinung verbundene Anteil der Strahlungsleistung im Verhältnis zur Gesamt-Strahlungsleistung.

Die hier angedeuteten Erscheinungen erklären das eingangs dieses Paragraphen genannte Verhalten der Glühlampen. Man wird um so günstiger arbeiten, je höher die Temperatur des Leuchtkörpers getrieben wird, vorausgesetzt, daß er diese Temperatur genügend lange verträgt. Die Lichtstärke der Glühlampen vergrößert sich sehr schnell mit der Steigerung der Lampenspannung. Von der normalen Spannung aus gibt eine Spannungsänderung von 1% etwa 6% Änderung der Lichtstärke. Auf Grund des Strebens zu hohen Temperaturen sind die z. T. seltenen, aber hitzebeständigeren Materialien aufgesucht und der Kohle vorgezogen worden. Eine neue Lampe wird nur dann brauchbar, wenn ihre Gesamtkosten, bestehend aus der Summe der Anschaffungskosten und der Stromkosten für die von ihr abgegebene Zahl der Hefnerkerzenstunden sowie ihrer Bedienungskosten, geringer sind, als diejenigen bereits vorhandener Lampen.

Die Bogenlampen im allgemeinen, und diejenigen mit weiß- und gelbgefärbtem Lichtbogen im besonderen, arbeiten günstiger, als die Glühlampen. Das stimmt wieder mit obigen Betrachtungen überein, denn die Temperatur des Lichtbogens (etwa 4000 Grad) ist höher als die bei Glühlampen bisher anwendbaren Temperaturen (1800 bis 2200 Grad). Bei den getränkten Kohlen kommt das Fluoreszenzleuchten hinzu, wodurch die Lichtausbeute sich bedeutend erhöht.

Die Tabelle von Seite 181 gibt für die gebräuchlichen Lichtquellen ungefähr Anhaltspunkte für die ihnen zukommende Stelle in wirtschaftlicher Hinsicht, indem die erste als die günstigste, die letzte als die ungünstigte erscheint. Die angegebenen Lichtstärken sind räumlich gerechnet. Die der Berechnung zugrunde gelegten Werte sind in der Tabelle angegeben, wodurch die Nachrechnung bei Verschiebung der Marktpreise oder unter anderen Voraussetzungen ermöglicht wird.

Bei der Wahl eines Beleuchtungssystemes richtet man sich zweckmäßig nicht allein nach der durch diese Tabelle angegebenen Wirtschaftlichkeit, sondern auch nach dem speziellen Fall, der häufig die eine oder die andere Beleuchtungsart ausschließt. So z. B. gibt gerade

Art des Lichtes	Verbrauchskosten No. 1 (zur Speisung)	Speisebedarf pro Stunde und HK	Speisekosten pro Stunde und HK	Verbrauchskosten No. 2 (zum Ersatz)	Ersatzkosten pro Stunde und HK	Gesamtkosten pro Stunde und HK
Gelbes Bogenlicht	1 KWSt (selbsterzeugt) 15 Pf	0,4 Wattst.	0,006 Pf	1 Kohlenpaar 700 HK, 10 St., 42 Pf	0,006 Pf	0,012 Pf
Gewöhnl. Bogenl. (Klarglasgl.)	1 „ („) 15 „	1,0 „	0,015 „	1 „ 600 „ 10 „ 24 „	0,004 „	0,019 „
Gewöhnl. Bogenl. (Milchglasgl.)	1 „ („) 15 „	1,2 „	0,018 „	1 „ 600 „ 10 „ 30 „	0,005 „	0,023 „
Gelbes Bogenlicht	1 „ (bezogen) 50 „	0,4 „	0,020 „	1 „ 700 „ 10 „ 42 „	0,006 „	0,026 „
Osram-, Wolframlampe usw.	1 KWSt (selbsterzeugt) 15 Pf	1,1 Wattst.	0,0165 Pf	1 Lampe 32 HK, 1000 St., 300 Pf	0,0095 Pf	0,026 Pf
Gasglühlicht	1 cbm Leuchtgas 15 „	2,0 l	0,030 „	1 Strumpf 60 „ 500 „ 30 „	0,001 „	0,031 „
Petroleumglühlicht	1 kg Petroleum 23 „	1,3 g	0,030 „	1 „ 60 „ 500 „ 30 „	0,001 „	0,031 „
Osmiumlampe	1 KWSt. (selbsterzeugt) 15 „	1,5 Wattst.	0,022 „	1 Lampe 32 „ 1000 „ 325 „	0,010 „	0,032 „
Nernstlampe	1 KWSt (selbsterzeugt) 15 Pf	1,8 Wattst.	0,027 Pf	1 Brenner 45 HK, 300 St., 65 Pf	0,005 Pf	0,032 Pf
Tantallampe	1 „ („) 15 „	1,6 „	0,024 „	1 Lampe 25 „ 500 „ 250 „	0,020 „	0,044 „
Gewöhnl. Bogenl. (Klarglasgl.)	1 „ (bezogen) 50 „	1,0 „	0,050 „	1 Kohlenpaar 600 „ 10 „ 24 „	0,004 „	0,054 „
Kohleglühlampe	1 „ (selbsterzeugt) 15 „	3,3 „	0,050 „	1 Lampe 16 „ 800 „ 50 „	0,004 „	0,054 „
Acetylenglühlicht	1 cbm Acetylen 150 Pf	0,4 l	0,060 Pf	1 Strumpf 60 HK, 500 St., 30 Pf	0,001 Pf	0,061 Pf
Osram-, Wolframlampe usw.	1 KWSt (bezogen) 50 „	1,1 Wattst.	0,055 „	1 Lampe 32 „ 1000 „ 300 „	0,0095 „	0,0645 „
Gewöhnl. Bogenl. (Milchglasgl.)	1 „ („) 50 „	1,2 „	0,060 „	1 Kohlenpaar 600 „ 10 „ 30 „	0,005 „	0,065 „
Gewöhnl. Petroleumlampe	1 kg Petroleum 23 „	3 g	0,069 „	— —	—	0,069 „
Osmiumlampe	1 KWSt (bezogen) 50 Pf	1,5 Wattst.	0,075 Pf	1 Lampe 32 HK, 1000 St., 325 Pf	0,010 Pf	0,085 Pf
Nernstlampe	1 „ („) 50 „	1,8 „	0,090 „	1 Brenner 45 „ 300 „ 65 „	0,005 „	0,095 „
Tantallampe	1 „ („) 50 „	1,6 „	0,080 „	1 Lampe 25 „ 500 „ 250 „	0,020 „	0,100 „
Spiritusglühlicht	1 kg Brennspiritus 45 „	2,5 g	0,113 „	1 Strumpf 60 „ 500 „ 30 „	0,001 „	0,114 „
Gaslicht, Rundbrenner	1 cbm Leuchtgas 15 Pf	10 l	0,150 Pf	— —	—	0,150 Pf
Acetylenlicht	1 „ Acetylen 150 „	1 l	0,150 „	— —	—	0,150 „
Kohleglühlampe	1 KWSt (bezogen) 50 „	3,3 Wattst.	0,165 „	1 Lampe 16 HK, 800 St., 50 Pf	0,004 Pf	0,169 „
Gaslicht, Schnittbrenner	1 cbm Leuchtgas 15 „	17 l	0,255 „	— —	—	0,255 „

die Unterteilungsmöglichkeit bei Verwendung kleinerer Lichtquellen den Glühlampen oft den Vorzug gegen die Bogenlampen, obgleich die Glühlampen nicht an erster Stelle stehen. Man kann eben durch die Unterteilung das Licht auf besondere Gegenstände konzentrieren, die gerade hell erleuchtet sein sollen, und braucht nicht ganze Säle um nur weniger Arbeitsstellen willen sonst nutzlos zu erleuchten. Auch die Bogenlampentechnik erkennt das an und hat kleinere Lichter geschaffen, bei denen aber wieder der Kohlenersatz mehr in die Wagschale fällt.

IV. Übungen aus dem Gebiet des Beleuchtungswesens.

§ 61. Rechenbeispiele.

1. Beispiel. Eine Dauerbrand-Hauptschlußlampe löst aus bei $I = 6$ Ampere. Sie soll von einer Netzspannung $E = 110$ Volt aus so angeschlossen werden, daß sie kurz vor dem Auslösen an ihren Kohlen eine Spannung $e_1 = 80$ Volt aufweist.

a) Was ist zu diesem Zweck zu tun?
b) Was geschieht, wenn nach Erledigung von (a) ohne weitere Änderung die Netzspannung auf $E' = 120$ Volt geändert wird?

Zu a): Es ist ein Widerstand vorzuschalten von der Größe:

$$w = \frac{E - e_1}{I} = \frac{110 - 80}{6} = 5 \text{ Ohm.}$$

Zu b): Die Lampe brennt vor dem Auslösen mit einer Spannung zwischen den Kohlen:

$$e_1' = E' - I \cdot w = 120 - 6 \cdot 5 = 90 \text{ Volt.}$$

2. Beispiel. Eine Nebenschlußlampe löst aus, wenn ihre Spannung zum Werte $e_1 = 40$ Volt gestiegen ist. Sie soll von einer Netzspannung $E = 65$ Volt so angeschlossen werden, daß sie kurz vor der Auslösung mit einem Strome $I = 10$ Ampere brennt.

a) Was ist zu diesem Zweck zu tun?
b) Wie hoch ist die Lampenspannung nach Erledigung von (a) in dem Augenblick kurz nach dem Regelungsvorgang, wenn ihre Stromstärke dann zu $I' = 11$ Ampere gemessen wird?

Zu a): Es ist ein Widerstand vorzuschalten von der Größe:

$$w = \frac{E - e_1}{I} = \frac{65 - 40}{10} = 2{,}5 \text{ Ohm.}$$

Zu b): Die Lampe brennt kurz nach dem Regelungsvorgang mit einer Spannung:

$$e_1' = E - I' \cdot w = 65 - 11 \cdot 2{,}5 = 37{,}5 \text{ Volt.}$$

3. Beispiel. Zwei auf je $e_1 = 40$ Volt geregelte Nebenschlußlampen sind hintereinandergeschaltet und mit einem Vorschaltwiderstand von $w = 6$ Ohm an eine Netzspannung $E = 110$ Volt angeschlossen. Bei welcher Stromstärke lösen die Lampen aus?

Die zu erwartende Stromstärke beträgt:

$$I = \frac{E - 2 \cdot e_1}{w} = \frac{110 - 2 \cdot 40}{6} = 5 \text{ Ampere.}$$

4. Beispiel. 6 hintereinandergeschaltete Differentiallampen brennen von $E = 220$ Volt aus ohne Vorschaltwiderstand mit $I = 6{,}5$ Ampere. Eine dieser Lampen soll zu Ausbesserungszwecken aus dem Kreise entfernt werden, ohne daß ein Ersatz für sie vorhanden ist. An der Stelle der beseitigten Lampe werden die Leitungsenden unmittelbar verbunden. Welche Änderungen treten dadurch im Bogenlampenkreise auf?

Die Lampen brannten vorher mit einer Spannung:

$$e_1 = \frac{E}{6} = \frac{220}{6} = 36{,}66\ldots \text{ Volt;}$$

da ihre Stromstärke $I = 6{,}5$ Ampere betrug, regeln sie auf einen Widerstand:

$$w = \frac{e_1}{I} = \frac{36{,}66}{6{,}5} = 5{,}65 \text{ Ohm.}$$

Für 5 dieser Lampen haben wir den Widerstand zu setzen:

$$W = 5 \cdot w = 5 \cdot 5{,}65 = 28{,}2 \text{ Ohm.}$$

Die neue Stromstärke beträgt daher:

$$I' = \frac{E}{W} = \frac{220}{28{,}2} = 7{,}8 \text{ Ampere,}$$

bei der neuen Spannung:

$$e_1' = E : 5 = 220 : 5 = 44 \text{ Volt.}$$

Es hängt von dem Leitungsquerschnitt und der Erwärmung der Spulen ab, ob diese Schaltung zu 5 Lampen statthaft ist.

5. Beispiel. Es soll eine 110 Volt-Beleuchtungsanlage bestehen aus:

1. 200 Kohleglühlampen zu 16 HK und 110 Volt,
2. 82 Wolframlampen zu 25 HK und 110 Volt,
3. 12 gewöhnliche Bogenlampen (mit Milchglasglocken) zu je 700 HK.

Die Bogenlampen sollen mit $e_1 = 42$ Volt gebrannt und zu zweien hintereinandergeschaltet werden.

a) Wieviel Leistung beansprucht die Beleuchtungsanlage ohne Berücksichtigung der Verluste in den Leitungsdrähten?

b) Wieviel Leistung muß ein Antriebsmotor an die Dynamomaschine dieser Anlage abgeben, wenn der Wirkungsgrad der Anlage vom Schwungrad der Antriebsmaschine aus bis an das Ende der Leitungsstränge $\eta = 0{,}75$ betragen möge?

c) Wie groß sind die Stromstärken der einzelnen Lampen und der ganzen Anlage?

Zu a): Aus der Tabelle von Seite 181 ergibt sich der Wattverbrauch der einzelnen Lampen:

1. für die 16 HK-Lampen:

einzeln: $l_1 = 16 \cdot 3{,}3 = 53$ Watt,
für 200 Stück: $L_1 = 200 \cdot 53 = 10600$ Watt;

2. für die 25 HK-Wolframlampen:

einzeln: $l_2 = 25 \cdot 1{,}1 = 27{,}5$ Watt,
für 82 Stück: $L_2 = 82 \cdot 27{,}5 = 2250$ Watt;

3. für die Bogenlampen:

einzeln: $l_3 = 700 \cdot 1{,}2 = 840$ Watt,
für 12 Stück: $L'_3 = 12 \cdot 840 = 10080$ Watt.

Diese 10080 Watt treten für die Bogenlampen auf, an deren Klemmen für 2 hintereinandergeschaltete Lampen $E_1 = 2 \cdot e_1 = 2 \cdot 42 = 84$ Volt liegen. Jeder Bogenlampenkreis geht aber von $E = 110$ Volt aus. Die $E - E_1 = 110 - 84 = 26$ Volt $(= E_2)$ werden im Vorschaltwiderstand jedes Kreises vernichtet. Die Gesamtleistung der 6 Bogenlampenkreise ist daher:

$$L_3 = L'_3 \cdot \frac{E}{E_1} = 10080 \cdot \frac{110}{84} = 13200 \text{ Watt.}$$

Die Beleuchtungsanlage beansprucht die Leistung:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = 10600 + 2250 + 13200 = 26050 \text{ Watt.}$$

Zu b): Die effektive Leistung des Antriebsmotors muß sein:

$$L_e = L : \eta = 26050 : 0{,}75 = 34730 \text{ Watt}$$

oder in Pferdestärken:

$$L_{e\,\mathrm{PS}} = 34730/736 = 47{,}2 \text{ PS.}$$

Zu c): Die Stromstärke der 16 HK-Lampe beträgt:

$$i_1 = l_1 : E = 53 : 110 = 0{,}482 \text{ Ampere;}$$

diejenige der 25 HK-Wolframlampe:

$$i_2 = l_2 : E = 27{,}5 : 110 = 0{,}25 \text{ Ampere;}$$

diejenige der Bogenlampen:

$$i_3 = l_3 : e_1 = 840 : 42 = 20 \text{ Ampere,}$$

die Gesamtstromstärke der Anlage:

$$I = L : E = 26050 : 110 = 236{,}9 \text{ Ampere.}$$

6. Beispiel. Eine Bogenlampe habe

1. unter dem Winkel $\alpha_1 = 30^0$ vom Lot aus eine Lichtstärke $J_1 = 700$ HK
2. „ „ „ $\alpha_2 = 45^0$ „ „ „ „ „ $J_2 = 1500$ HK
3. „ „ „ $\alpha_3 = 60^0$ „ „ „ „ „ $J_3 = 1000$ „ .

a) Wie hoch muß der Lichtpunkt der Bogenlampe über dem wagerechten Erdbogen hängen, damit seine Beleuchtung da, wo ihn der 30^0-Strahl trifft, $E_{1H} = 4$ Lux beträgt?

b) Wie groß ist bei dieser Höhe der Lampe die Beleuchtung des wagerechten Bodens beim Auftreffen des 45°- und 60°-Strahles?

c) Wie weit müssen 2 gleiche Bogenlampen gleicher Höhe voneinander entfernt sein, wenn ihre beiden 60°-Strahlen sich auf dem Erdboden in der Mitte zwischen den Fußpunkten der Lampenlote treffen sollen.

d) Wie groß ist die Beleuchtung des Erdbodens in der Mitte zwischen beiden Lampen?

Zu a): Die Beleuchtung einer normal zum Lichtstrahl stehenden Fläche beträgt allgemein (vgl. § 56):

$$E = \frac{J}{l^2},$$

wobei E die Beleuchtung in Lux,
J die Lichtstärke der Lampe in HK und
l die in m gemessene Entfernung der betrachteten Stelle vom Lichtpunkt aus

bedeutet. Fällt dieses Licht nun auf eine um den Winkel β gegen den Lichtstrahl geneigte Fläche, so ist die Beleuchtung dieser Fläche in demselben Maße geringer, wie die Projektion des normal zum Lichtstrahl stehenden Flächenelementes auf der schräg stehenden Fläche vergrößert wird. Die Beleuchtung der schrägen Fläche E_S beträgt (vgl. Fig 163):

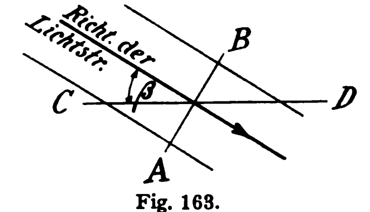


Fig. 163.

$$E_S = E \cdot \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}},$$

wobei $\overline{AB}$ und $\overline{CD}$ die Spuren der beiden Ebenen bedeuten; oder es ist:

$$E_S = E \cdot \sin \beta.$$

Das auf den vorliegenden Fall übertragen, ergibt die Beleuchtung des Erdbodens an dem unter 1. genannten Strahle:

$$E_{1H} = \frac{J_1}{l_1^2} \cdot \sin \beta = \frac{J_1}{l_1^2} \cdot \sin (90 - \alpha);$$

unbekannt ist in dieser Gleichung die Länge l_1, die sich somit ergibt:

$$l_1 = \sqrt{\frac{J_1 \cdot \sin (90 - \alpha)}{E_{1H}}} = \sqrt{\frac{700 \cdot \sin 60^0}{4}} = 12{,}3 \text{ m}.$$

Die Höhe des Lichtpunktes über dem Erdboden muß daher betragen:

$$h = l_1 \cdot \cos \alpha = 12{,}3 \cdot \cos 30^0 = 10{,}65 \text{ m}.$$

Zu b): Für den 45°-Strahl wird:

$$l_2 = h : \cos \alpha_2 = 10{,}65 : \cos 45^0 = 15{;}06 \text{ m}$$

und

$$E_{2H} = \frac{J_2}{l_2^2} \cdot \sin (90 - \alpha_2) = \frac{1500}{15{,}06 \cdot 15{,}06} \cdot \sin 45^0 = 4{,}68 \text{ Lux}.$$

Für den 60°-Strahl wird:

$$l_3 = h : \cos\alpha_3 = 10{,}65 : \cos 60^\circ = 21{,}3 \text{ m}$$

und

$$E_{3H} = \frac{J_3}{l_3^2} \cdot \sin(90 - \alpha_3) = \frac{1000}{21{,}3 \cdot 21{,}3} \cdot \sin 30^\circ = 1{,}105 \text{ Lux.}$$

Zu c): Die gegenseitige Entfernung der beiden Bogenlampen muß betragen:

$$l' = 2 \cdot h \cdot \text{tang}\,\alpha_3 = 2 \cdot 10{,}65 \cdot \text{tang} \cdot 60^\circ = 36{,}9 \text{ m.}$$

Zu d): Die Beleuchtung des Erdbodens in der Mitte zwischen beiden Lampen ist gleich der Summe der horizontalen Beleuchtungen der beiden Lampen:

$$E'_{3H} = 2 \cdot E_{3H} = 2 \cdot 1{,}105 = 2{,}21 \text{ Lux.}$$

§ 62. Leitungspläne.

Für Starkstromanlagen werden schematische Darstellungen angefertigt, die gewöhnlich aus mehreren Teilen, dem Leitungsplan und dem Schaltungsschema, bestehen. Sie sollen nach den Verbandsvorschriften folgende Angaben enthalten:

I. Stromarten und Spannungen,
II. Anzahl, Art und Stromstärke der Stromerzeuger, Transformatoren und Akkumulatoren,
III. Art der Abschaltung und Sicherung der einzelnen Teile der Anlage,
IV. Angabe der Leitungsquerschnitte,
V. Die notwendigen Angaben über Stromverbraucher.

Für diese Darstellungen sind bestimmte Zeichen der Einzelteile und bestimmte Buchstabenbezeichnungen eingeführt, von denen die wichtigsten hier folgen:

⊙ 10 = Dynamomaschine bzw. Elektromotor jeder Stromart mit Angabe der höchsten zulässigen Beanspruchung in Kilowatt.

−|ı|ı|ı|− = Akkumulatoren.

−□− = Sicherung.

⊠ 10 = Widerstand, Heizapparate und dergl. mit Angabe der höchsten zulässigen Stromstärke (10 Ampere).

⌇ = Drosselspule.

⁘ = Hebelausschalter.

× = Glühlampe jeder Art und Kerzenstärke.

⊗ 6 = Bogenlampe mit Angabe der Stromstärke (6) in Ampere.

Diese Zeichen werden gewöhnlich in einem Schaltungsschema so angewendet, wie das in den schematischen Darstellungen des Lehr-

buches geschehen ist. Für Schaltungsschemata sind daher weitere Bemerkungen überflüssig. Dagegen weichen die Leitungspläne von der Darstellungsweise der Schemata erheblich ab, indem eine Doppelleitung oder eine Dreifachleitung durch eine glatte Linie mit zwei oder drei kurzen Querstrischen angedeutet wird. Verdrillte Leitungen und Schnüre werden durch je eine strichpunktierte Linie ausgedrückt. An Stelle der Querstriche ist auch eine Bezeichnungsweise in Gebrauch, die eine Doppelleitung mit einem einfachen Strich, eine Einzelleitung dagegen mit einem gerissenen Strich andeutet, so daß eine dreifache Leitung als glatter Strich mit danebenliegender gerissener Linie erscheint.

Im Leitungsplan interessiert noch die Isolierungs- und Verlegungsart der Leitungen, sowie die Verwendung der Räume, wobei feuchte und durchtränkte Räume, sowie Räume mit explosiblen Gasen besonders hervorgehoben werden. Der Querschnitt der Leitungen wird in qmm ausgedrückt auf die Leitungslinien gesetzt. Es kommen für Leitungspläne noch folgende häufig gebrauchte Zeichen bzw. Bezeichnungen dazu

/ = nach oben } führende Steigleitung.
/ = nach unten }
B C = blanker Kupferdraht.
G B = Gummibandleitung.
G A = Gummiaderleitung.
P A = Panzerader.
S A = Gummiaderschnur.
P L = Pendelschnur.
K B = blankes Kabel.
K A = asphaltiertes Kabel.
K E = armiertes asphaltiertes Kabel.
(g) = Verlegung auf Isolierglocken.
(r) = „ „ Isolierrollen.
(k) = „ „ Isolierklemmen.
(o) = „ in Rohren.
⊗ 5 = fester Lampenträger mit Lampenzahl (5).
—·—·—·— = fest verlegte Mehrfachleitung oder- Schnur.
~~~ = bewegliche Leitungsschnur.
)- 6 = Wandfassung, Anschlußdose mit Angabe der Stromstärke (6 Ampere).
Ø 6 Ø 6 Ø 6 = einpoliger bzw. zweipoliger bzw. dreipoliger Dosenschalter mit Angabe der höchsten zulässigen Stromstärke (6) in Ampere.
Ø 3 = Dosenumschalter, desgl.

Ein Beispiel für den Leitungsplan einer Glühlampenanlage gibt Fig. 164. Das in Fig. 164 dargestellte Stockwerk erhält den Strom durch die neben der Schalttafel angedeutete Steigleitung.
~~~

Jeder glatte Strich bedeutet hierin eine Doppelleitung. Die Leitungen gehen aus von einer Verteilungstafel, die durch einen kurzen dicken Strich angedeutet ist. An ihr sind die Leitungen mit je 6 Ampere-

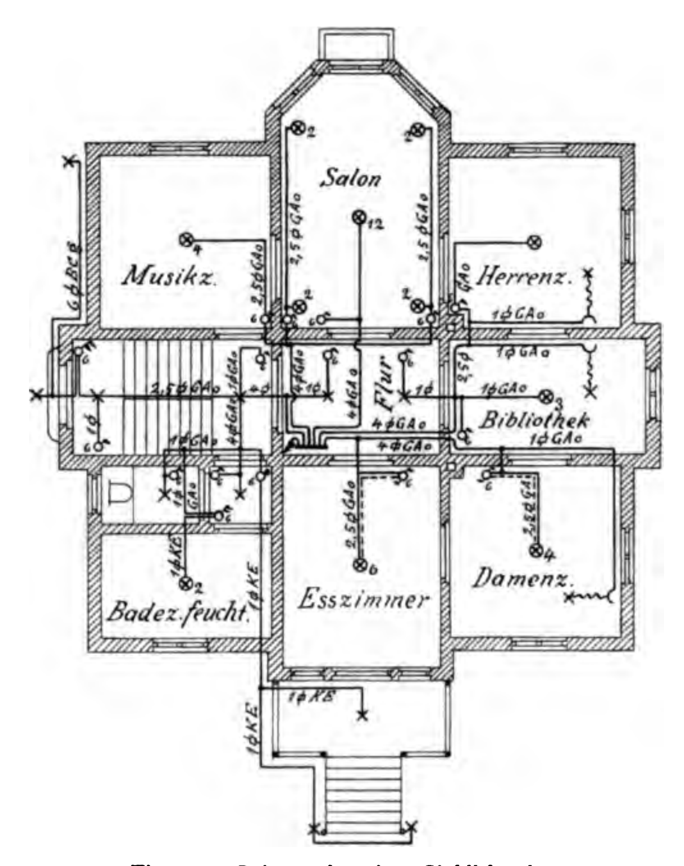


Fig. 164. Leitungsplan einer Glühlichtanlage.

patronen gesichert zu denken. Diese Darstellungweise läßt nicht erkennen, welche Teile an der Schalttafel enthalten sind, daher ist die neuere Bezeichnungsweise, die an Stelle der Schalttafel die Sammelschienen als ein langes schmales Rechteck mit Leitungslinien an der Langseite im Plane vermerkt, als eine Verbesserung anzusehen.

8. Kapitel.

Magnetismus, Elektromagnetismus und Induktionserscheinungen.

§ 63. Die Grundgesetze des Magnetismus.

Ein Eisenerz, der Magneteisenstein (Fe_3O_4), besitzt eine Eigenschaft, weiches Eisen anzuziehen. Bringen wir ihn in Eisenfeilspäne, so bleiben an mehreren Ecken und Kanten nach dem Herausziehen Eisenfeilbärte an ihm hängen. Führen wir eine dieser Kanten über ein Stäbchen aus hartem Stahl, so nimmt es die gleichen Eigenschaften an. Die Ursache dieser Erscheinungen nennen wir Magnetismus, ein Körper, der diese Eigenschaften zeigt, heißt ein Magnet (natürliche und künstliche Magnete, Übertragung des Magnetismus durch „Striche").

An einem stabförmigen Stahlmagneten bleiben die Eisenfeilspäne in einer Verteilung haften, wie das durch Fig. 165 wiedergegeben ist; es ist daran zu erkennen, daß die Wirkung hauptsächlich an den Enden des Stabes auftritt. Hängt man Magnetstäbe in einigem Abstand frei beweglich auf, daß sie eine Drehung in der Wagerechten ausführen können (Magnetnadel), so stellen sie sich parallel zueinander in einer bestimmten Richtung ein, die ungefähr* mit der geographischen Süd-Nordrichtung zusammenfällt. Die nach Norden zeigende Spitze einer Magnetnadel heißt die Nordspitze, die entgegengesetzte die Südspitze der Nadel. Zwei sich im Raume nach der gleichen Richtung einstellende Enden stoßen einander ab, zwei entgegengesetzte ziehen sich gegenseitig an. Nähert man einer frei drehbaren Magnetnadel einen zweiten Magneten, so beobachtet man wieder, daß die Wirkung von den Enden ausgeht. Mit einem festen und einem drehbaren Magneten läßt sich wahrnehmen, daß die Kräfte auf weitere Umgebung der Stabenden hin vorhanden sind, und daß sie vor den Stabenden sich auf einen Punkt hin richten, der gegen das äußere Stabende etwas zur Mitte des Stabes hin verschoben ist (vgl. die Eisenbärte in Fig. 165). Die Punkte, auf die sich die vor den Stabenden auftretenden Kräfte richten, heißen die Pole. Jeder Magnet hat zwei Pole, und zwar entsprechend der Bezeichnung der Stabenden einen Nordpol und einen Südpol. Nord- mit Nordpol und Süd- mit Südpol zusammengebracht stoßen einander ab, Nord- und Südpole ziehen einander an, oder was dasselbe heißt: Gleichnamige Magnetpole üben abstoßende, ungleichnamige üben anziehende Kräfte auf-

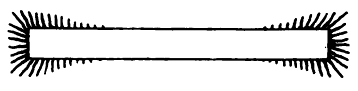


Fig. 165.

*) Vgl. w. u. unter Deklination.

einander aus (vgl. hiermit die Wirkung von Elektrizitätsmengen aufeinander, § 8). Die Größe der magnetischen Kräfte ist zuerst von Coulomb[Hist. 15] untersucht worden. Es hat sich dabei ergeben, daß wir den Magnetpolen konstante Werte beilegen können, die als die an dem Pol auftretende magnetische Menge aufzufassen sind, und die auch als Polstärke bezeichnet werden. Seien diese Polstärken zweier aufeinander wirkender Pole mit $\mathfrak{m}_1$ und $\mathfrak{m}_2$ bezeichnet, so ist die auftretende Kraft:

$$P = c \frac{\mathfrak{m}_1 \cdot \mathfrak{m}_2}{r^2},$$

wobei die Größe r den gegenseitigen Abstand der Pole und c eine von den gewählten Maßeinheiten abhängige Konstante bedeutet (vgl. das Newtonsche Gravitationsgesetz § 4, S. 4, Fußnote und das Coulombsche Gesetz für Elektrizitätsmengen § 8, S. 14). Obiger Ausdruck ist das Coulombsche Gesetz für Magnetpole. Sind die Magnetpole, deren Polstärken $\mathfrak{m}_1$ und $\mathfrak{m}_2$ bezeichnet sind, gleichnamig, so ist dieses P abstoßende, sind sie ungleichnamig, so ist dieses P anziehende Kraft, beide Kräfte unter sonst gleichen Umständen gleicher Größe. Das Gesetz besagt, daß die Kraftwirkung zweier Pole aufeinander, gerade wie diejenige der Massen und der Elektrizitätsmengen, sich unendlich weit erstreckt, daß aber die Kraft mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, so daß der Einfluß sehr entfernter Pole praktisch verschwindet. Das Coulombsche Gesetz hat für die moderne Lehre vom Magnetismus die größte Bedeutung, weil bei der später zu gebenden Festlegung des Maßsystemes auf Grund dieses Gesetzes zunächst die Festlegung des Einheitspoles erfolgt.

Ein Raum, in dem magnetische Kräfte wirken, heißt ein magnetisches Feld. Da von jedem Magnetpol nach allen Seiten eine Kraftwirkung ausgeht, ist ein Pol mit einem magnetischen Felde umgeben. Da sich im Raume frei drehbare Magnete parallel und gleichgerichtet einstellen, umgibt uns überall ein magnetisches Feld, mit dem die Erde behaftet ist, und das den Namen Erdfeld trägt. Die Richtung, nach der sich die Nordspitze einer nach allen Richtungen hin frei drehbaren Magnetnadel einstellt (Universalgelenk), heißt die Richtung des Feldes. Die Richtung des Erdfeldes weicht von der geographischen Nordrichtung um einen Winkel von ungefähr $9^1/_2$ Grad (= Deklinationswinkel) und von der wagerechten Ebene nach unten gerichtet um etwa $66^1/_3$ Grad (= Inklinationswinkel) ab, und zwar gelten diese Zahlen etwa für Mitteldeutschland und für die Gegenwart. Die Werte sind mit Ort und Zeit veränderlich, aber so wenig für ein Jahr und für eine Stadt veränderlich, daß man sie innerhalb der angegebenen Grenzen unter Abwesenheit von Eisen praktisch als konstant ansehen kann. So läßt sich mit genügender Annäherung sagen: Das Erdfeld ist, wo es nicht durch die Gegenwart von Eisen gestört wird, in einem begrenzten Raume überall gleich gerichtet. Das Feld, das einen Magnetpol umgibt, sofern ein solcher allein vorhanden sein könnte, ist nach allen

Seiten verschieden gerichtet, denn die Kraftwirkung tritt stets, wenn nur zwei Pole aufeinander wirken, in der Richtung der Verbindungslinie beider Pole, also strahlenförmig auf.

Nun aber ist der Fall des Auftretens einzelner Magnetpole in der Natur nicht vorhanden, sie treten vielmehr stets paarweise in gleicher Stärke auf. Was dann geschieht, wenn die beiden Pole eines Magnetstabes auf eine mit 2 Polen in Rechnung gesetzte Magnetnadel wirken, ist in Fig. 166 bildlich ausgedrückt:

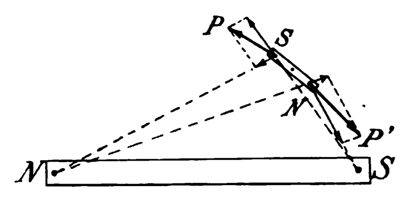


Fig. 166.

Die von beiden Polen herrührenden magnetischen Kräfte setzen sich zu Resultierenden zusammen, und die Nadel befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Resultierende sämtlicher Kräfte durch ihren Drehpunkt geht. Die beiden Resultierenden *P* und *P'*, die an den Polen der Nadel angreifen, bilden, sofern nicht die Nadel sich auf der magnetischen Achse des Stabes befindet, zusammen einen von 180 Grad verschiedenen Winkel und die Resultante dieser beiden Kräfte, die in der Figur weggelassen ist, triebe die Nadel zum Magnetstab hin, wenn sie nicht im Drehpunkt festgehalten wäre. Konstruiert

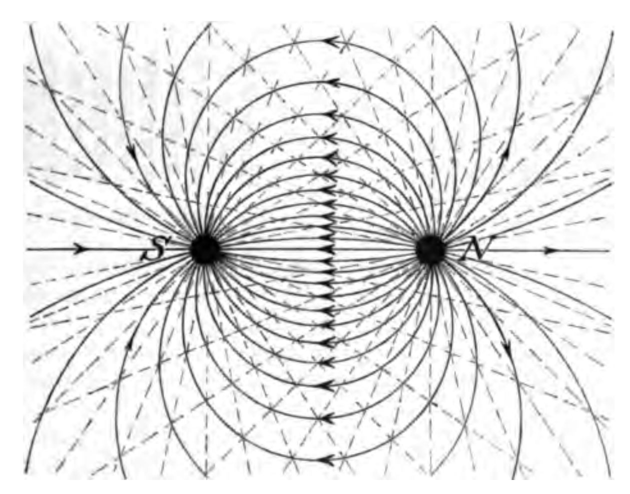


Fig. 167.

man aus den räumlich in gleichem Winkelabstand voneinander zu denkenden Strahlen der Einzelpole für eine Reihe von Stellen die Richtungen, nach denen sich die Magnetnadel unter dem Einfluß beider Pole einstellen würde, so erhält man unter Voraussetzung der punktförmigen Magnetpole eine Schar von Kurven, wie sie in einer Schnitt-

ebene durch die Pole Fig. 167 darstellt, und von denen schon Gauß[Hist. 34)] nachgewiesen hat, daß sie Kreise sind. Die Pfeile geben an, nach welcher Richtung der Nordpol der Nadel zeigen würde. Die Kurven bedeuten für jeden Punkt die Richtung des resultierenden Feldes. Sie sind zu denken als die Diagonalen der Parallelogramme, die entstehen würden, wenn die Winkelteilung immer mehr verfeinert würde.

§ 64. Teilung der Magnete, Molekularmagnete, Eisen in der Nähe von Magneten.

Wird zunächst ein Magnetstäbchen an der Nordspitze einer Magnetnadel entlang geführt, so zeigt sich, daß der Nordmagnetismus etwa bis zur Mitte des Magneten reicht, während an der anderen Hälfte des Magneten nur Südmagnetismus auftritt. Teilen wir nun das Stäbchen in zwei gleiche Teile, so zeigt jeder Teil wiederum zur Hälfte Süd- und zur Hälfte Nordpolarität. Auch eine weitere Teilung gibt jedesmal selbständige Magnete, wobei jeder zwei Pole hat. Die Polarität der freien Enden bleibt vor und nach der Teilung die gleiche. Die Zerlegung bis zu den kleinsten Teilen fortgesetzt führt zu der Auffassung, die sich zur Erklärung einiger Vorgänge durchführen läßt, daß ein Magnetstab aus einer großen Anzahl von Molekülen besteht, die selbst kleine Magnete sind. Auch wenn der Stahl noch nicht magnetisiert worden ist, sind diese Molekularmagnete bereits vorhanden, sie liegen dann nur wirr durcheinander, etwa wie es Fig 168 angibt. Diese





Fig. 168. Molekularmagnete.

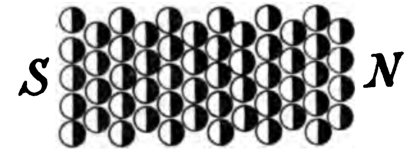


Fig. 169. Molekularmagnete.

wirr durcheinander liegenden Magnetmoleküle, bei denen der Nordpol schwarz, der Südpol weiß gekennzeichnet ist, üben nach außen keine Wirkung aus.

Erst wenn ein vorhandener Magnet diesem Stahl genähert wird, so richten sich unter Überwindung innerer Kräfte die Molekularmagnete, wie kleine Magnetnadeln, gleich, behalten bei Anwendung harten Stahles zum größten Teil ihre Lage bei und wirken dann zusammen wie ein großer Magnet. Die letztgenannte Lage der Molekularmagnete ist in Fig. 169 ausgedrückt. Der Nordpol des Magnetstabes entsteht an der Seite, nach welcher die Nordpole der Molekularmagnete zeigen.

Auch das weiche Eisen rechtfertigt für sich die Vorstellung von Molekularmagneten. Verlängert man einen Magnetstab mit einem Stück weichen Eisen, so tritt an der Stoßstelle bei inniger Berührung nur noch wenig Magnetismus auf, während der Pol nun an das Ende des weichen Eisens gerückt ist. Auch das weiche Eisen ist magnetisiert

worden. Führt man die Enden an der Stoßstelle auseinander, so ist das dem Nordpol zugekehrte Ende des Eisens ein Südpol geworden, was mit einer Magnetnadel festgestellt werden kann, solange der Nordpol des Magneten in seiner Nähe bleibt. Entfernt man den Magnetstab, so verschwindet auch der Magnetismus am weichen Eisen nahezu ganz.* Daraus folgt: Die im weichen Eisen nach Fig. 168 regellos liegenden Moleküle werden durch einen benachbarten Magneten zwar gleichgerichtet, nehmen aber ihre regellose Lage wieder an, wenn die äußere Richtkraft weggenommen wird. Der unter Wegnahme des äußeren richtenden Feldes in Eisen und Stahl zurückbleibende Magnetismus heißt der remanente Magnetismus. Die Anwendung der Striche beim Magnetisieren beruht auf den hier genannten Erscheinungen.

Daß Eisen in der Nähe von Magneten selbst zum Magneten wird, benutzen wir zu den Eisenfeilbildern. Wir legen über einen Magnetstab einen Bogen Papier und erhalten nach dem Aufstreuen von Eisenfeilspänen mittels eines Siebes und nach leichter Erschütterung des Papieres Kurvenzüge, wie sie in Fig. 170 nachgebildet sind. Jedes auf das Blatt fallende Spänchen zieht in der Richtung der magnetischen Kräfte weitere Eisenteilchen an, und so entstehen Ketten von Eisenspänen, die die Richtung der magnetischen Kräfte erkennen lassen. Das Bild Fig. 170 erinnert an das frühere, Fig. 167, es zeigt nur den wesentlichen Unterschied, daß die Kurven zwischen den Stabenden in der Nähe der Stabachse anders verlaufen. Ein Stahlstab hat nicht nur zwei Pole, sondern eine Reihe von Polpaaren, die von den äußersten Polen aus zur Mitte des Stabes hin immer schwächer werden.

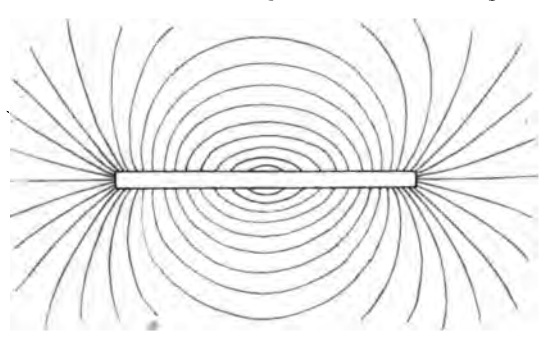


Fig. 170. Kraftverteilung eines Magnetstabes.

§ 65. Der Magnetismus als Strömungserscheinung und die Vorbereitung der Kraftlinien.

Bei allen Naturerscheinungen, die eine Wirkung umgekehrt proportional zum Quadrat eines Abstandes aufweisen, ist die Vorstellung einer Strömungserscheinung berechtigt. Dazu gehören die Gravitation der Massen, die Strahlung von Licht und Wärme, die Kräfte

* Er verschwindet noch mehr, wenn man das Eisen stark erschüttert, und gänzlich, wenn man es ausglüht.

zwischen elektrisch geladenen Körpern und die Kräfte zwischen Magnetpolen.

Fig. 171 stellt einen Magnetpol $\mathfrak{m}_1$ dar, von dem in einiger Entfernung ein zweiter Magnetpol $\mathfrak{m}_2$ aufgestellt ist; $\mathfrak{m}_1$ ist etwa zu denken als der Pol am Ende eines langen Magnetstabes, dessen zweiter Pol so weit entfernt liegt, daß er den Magnetismus des ersten nicht merkbar beeinflußt; $\mathfrak{m}_2$ ist etwa zu denken als die Spitze einer Magnetnadel, deren zweite Spitze ebenfalls außerhalb des Bereiches der ersten liegt. Wandern wir nun mit dem Pol $\mathfrak{m}_2$ in radialer Richtung immer weiter von $\mathfrak{m}_1$ fort, so nimmt auch die gegenseitige Kraft P ab, und zwar ist sie nach § 63 umgekehrt proportional zum Quadrat der gegenseitigen Entfernung der beiden Pole; im doppelten Abstand beträgt daher die Kraft $^1/_4$, im dreifachen $^1/_9$, im vierfachen $^1/_{16}$ des ursprünglichen Wertes.

$\mathfrak{m}_1$ o——→ P - - - P ←——o $\mathfrak{m}_2$

Fig. 171.

Wir denken uns nun nach übertriebener Andeutung durch Fig. 172 ein Raumwinkelelement, begrenzt durch vier sehr nahe beieinander liegende, durch einen Punkt M gehende Ebenen. Ihre gegenseitigen Spuren a, b, c, d sollen so liegen, daß man normal zu ihnen Quadrate zwischen ihnen einzeichnen kann. Die Fläche dieser Quadrate wächst dann proportional zum Quadrat ihres Abstandes von dem Punkte M. Beispielsweise verdoppelt sich im doppelten Abstand die Quadratseite, daher nimmt die Fläche den vierfachen Wert an; im dreifachen Abstand verneunfacht, im vierfachen versechzehnfacht sich die Fläche gegen den ursprünglichen Wert.

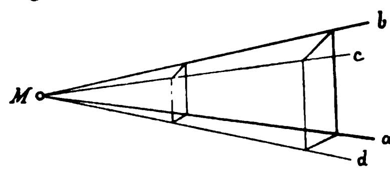


Fig. 172. Raumwinkelelement.

Denken wir uns weiterhin den Magnetpol $\mathfrak{m}_1$ der Fig. 171 bei M der Fig. 172 angebracht, so wird ersichtlich, daß innerhalb des durch die vier Strahlen begrenzten Raumwinkels über jede Fläche quer zu den vier Strahlen ein ganz bestimmter und konstanter Wert (*Kraft*) $\times$ (*Fläche*) verteilt ist. Dieser Wert drückt eine magnetische Menge aus, gerade wie die Polstärke, denn die magnetische Menge eines Poles (die Polstärke) erhalten wir als Summe der magnetischen Mengen der einzelnen Raumwinkelelemente über den räumlichen Vollwinkel um diesen Pol.

Nach dieser Betrachtung sind wir berechtigt die von einem Pole aus zu denkenden Strahlen nicht nur als Kennzeichen für die Richtung der magnetischen Kräfte, sondern unter Annahme einer bestimmten Anzahl von Strahlen auf das Raumwinkelelement die Dichte der Strahlen, d. h. die Zahl der Strahlen in der Flächeneinheit, als ein Maß für die Größe der magnetischen Kraft anzusehen, die auf den bestimmten angenommen zweiten Pol ausgeübt wird. Diese gedachten Linien heißen auf Faradays[Hist. 26]) Anregung Kraftlinien. Welche magnetische Menge

als eine Kraftlinie bezeichnet wird, folgt aus dem Paragraphen des absoluten Maßsystemes (§ 68). Die Zahl der gedachten Linien in der Einheit der Querschnittsfläche heißt die Feldstärke.

Unter Berücksichtigung der beiden Pole eines Magneten ändert sich die Vorstellung von den Kraftlinien nur insofern, als sie keine geraden Linien mehr sind. Ein Elementargebilde nach Fig. 173, bei dem aus den gesamten Kraftlinien ein Teil so herausgenommen sein soll, daß keine Kraftlinie geschnitten wird, heißt eine Kraftröhre. Innerhalb einer Kraftröhre ist wiederum an allen Stellen das Produkt aus der Kraft, die auf einen bestimmten Magnetpol ausgeübt wird, und der Querschnittsfläche dasselbe.

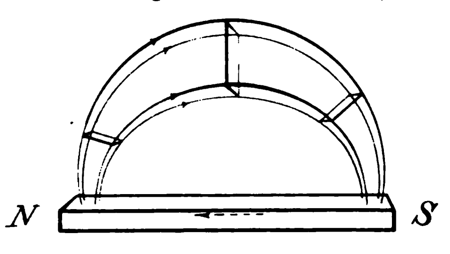


Fig. 173. Kraftröhre.

Das, was über die Richtung der magnetischen Kräfte gesagt ist, gilt auch von der Richtung der Kraftlinien: Sie gehen vom Nordpol aus durch die Luft (durch den Außenkreis) zum Südpol des Magneten. Die Strömungserscheinung findet ihren Schluß durch den Querschnitt des Magneten; in dem Magneten ist der Richtungssinn der Strömung vom Südpol zum Nordpol (Innenkreis). Soweit die Strömungserscheinung durch Eisen usw. geht, kann von Kraftlinien nicht mehr die Rede sein, da für diesen Teil jede Wirkung nach außen verschwindet. Verläuft die Strömungserscheinung nur durch Eisen, so daß eine Kraftwirkung des magnetischen Kreises nach außen überhaupt nicht zustande kommt, so heißt dieser Kreis ein geschlossener magnetischer Kreis im Gegensatz zum offenen, bei dem die Strömungserscheinung zum Teil durch Luft in Form von Kraftlinien ihren Weg nimmt. Jede Kraftlinie bildet einschließlich ihrer Fortsetzung durch Eisen einen in sich geschlossenen Linienzug.

In Richtung der Kraftlinien herrscht eine Zugkraft, oder, was dasselbe heißt, jede Kraftlinie sucht sich zu verkürzen. Parallele gleichgerichtete Kraftlinien stoßen sich gegenseitig ab. Parallele entgegengesetzte Kraftlinien ziehen sich gegenseitig an. Sich kreuzende magnetische Felder setzen sich wie Kräfte zu resultierenden Feldern zusammen, wobei die Feldstärken in der Parallelogrammkonstruktion nach Richtung und Größe durch Linien ausgedrückt werden können. Ebenso können magnetische Felder in Komponenten zerlegt werden.

Für technische Zwecke genügt mit hinreichender Annäherung der Satz, daß der Verlauf magnetischer Kraftlinien durch alle Körper, mit Ausnahme von Eisen, Nickel und Kobalt, der gleiche ist wie durch Luft, und die später folgenden Rechnungen erhalten für andere Materialien (Kupfer, elektrische Isoliermaterialien) keine Änderung gegen die Rechnung mit Lufträumen. Für wissenschaftliche Betrachtungen

teilt man die wenig beeinflußbaren Körper ein in diamagnetische und paramagnetische, während die stark beeinflußbaren als ferromagnetische bezeichnet werden.

Laufen in einem Raume die Kraftlinien parallel und in gleicher Dichte, so bezeichnet man dieses Feld als homogen.

Bringt man weiches Eisen in ein magnetisches Feld, so zieht es die Kraftlinien auf seine Enden hin zusammen. So z. B. erhält man das Kraftlinienbild Fig. 174, wobei *ab* einen Magnetstab und *cd* einen Stab aus weichem Eisen bedeuten möge. Eisen ist ein besserer Leiter für die magnetische Strömungserscheinung als Luft. Wo Kraftlinien auf Eisen zugehen, entsteht ein Südpol, wo Kraftlinien das Eisen verlassen, entsteht ein Nordpol. Bringt man in das mit Fig. 175 angedeutete homogene Feld einen Weicheisenstab, so würde er links einen Südpol, rechts einen Nordpol bekommen. Sein Kraftliniensystem würde, wenn das äußere Feld nicht da wäre, mit Fig. 176 angedeutet sein. Tatsächlich befindet er sich im magnetisierenden Felde und die Kraftlinien von Fig. 175 setzen sich mit denjenigen von Fig. 176 zu resultierenden zusammen, die durch Fig. 177 angedeutet

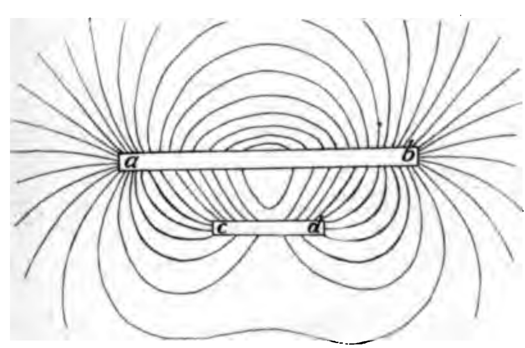
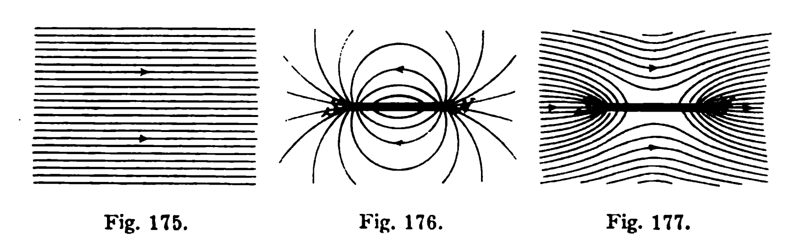


Fig. 174. Weiches Eisen in der Nähe eines Magnetstabes.


Fig. 175. Fig. 176. Fig. 177.

sind. Da die Kraftlinien des Stabes allein (Fig. 176) zwischen den Polen dem magnetisierenden Felde entgegengerichtet sind, wird in der Nähe des Eisens zwischen seinen Polen das Feld schwächer, als das ursprüngliche magnetisierende Feld an diesen Stellen gewesen war. Die Erscheinung heißt die entmagnetisierende Wirkung des Eisens im magnetischen Felde. Nachrechenbar ist die Entmagnetisierung nur bei Eisenkörpern in Form von Kugeln, Ellipsoiden und solchen Zylindern, deren Länge groß gegen ihren Durchmesser ist.

Wo Kraftlinien aus dem besser leitenden Material, dem Eisen, in das schlechter leitende Material, die Luft, eintreten, tritt eine plötzliche Brechung der Strömungserscheinung, ähnlich wie bei einem Lichtstrahl in Wasser, auf, und zwar ebenfalls eine Brechung zum Einfallslote hin, nur in bedeutend erheblicherem Maße als bei der Lichtstrahlbrechung von Luft in Wasser.

§ 66. Das Feld einiger Formen von Stromleitern.

Der elektrische Strom ist mit magnetischen Wirkungen verbunden: er lenkt die Magnetnadel ab, magnetisiert Eisen, übt Kräfte auf Eisen aus und steht unter dem Einfluß von Kräften, wenn ein zweiter Strom in seiner Nähe ist.

Zur Darstellung der Stromrichtung eines im Querschnitt gezeichneten Drahtes bedienen wir uns der in Fig. 178 ausgedrückten Bezeichnungsweise. Fließt der Strom auf den Beschauer zu, so würde der Strompfeil dem Beschauer die Spitze zukehren, was durch Fig. 178 *b* mit einem Punkt im Drahtquerschnitt angedeutet ist. Der in die Bildebene hinein gerichtete Strompfeil kehrt dem Beschauer die Feder zu, was nach Fig. 178 *a* durch ein Kreuz bezeichnet wird.



Fig. 178.

Eine im Raume frei drehbare Magnetnadel stellt sich in der Nähe eines Stromleiters unter Abwesenheit anderer magnetischer Kräfte nach Fig. 179 ein. Die magnetischen Kräfte sind um den Draht herum gerichtet. Fließt der Strom in die Bildebene hinein, so hat die Feldrichtung den Drehsinn des Uhrzeigers. Der auf den Beschauer zu gerichtete Strom erzeugt ein Feld gegen den Uhrzeigerdrehsinn (vgl. Ampèresche Schwimmregel).

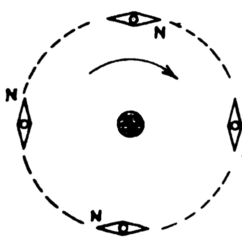


Fig. 179.

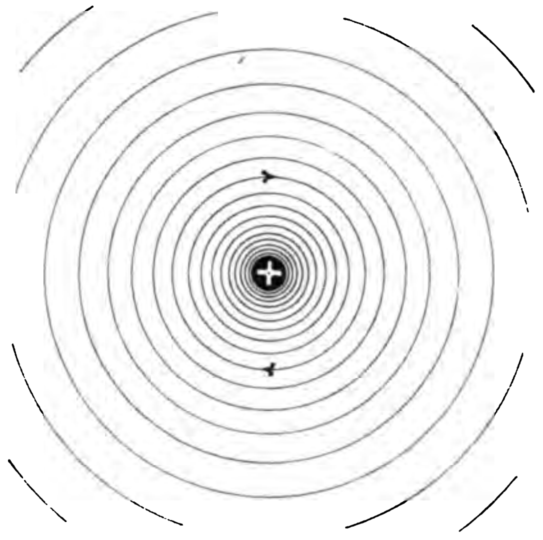


Fig. 180. Das Feld eines geraden Leiters.

Bei einem Stromleiter bilden die Kraftlinien in sich geschlossene Kurvenzüge um den Stromleiter herum. Sie sind Kreise nur in dem Falle eines langen geraden Leiters; ist der betrachtete Abstand vom Draht gering gegen seine Länge, so ist der Abstand von Kraftlinie zu Kraftlinie proportional zum Abstand der betrachteten Stelle vom Drahte (Fig. 180), oder was dasselbe heißt: Die Feldstärke ist dem Abstand vom Draht umgekehrt proportional (vgl. § 69 A).

Figur 180 entsteht, wenn man zwei nahe beieinander liegende Strahlen vom Drahtmittelpunkt aus zieht und nun die Kreise in solchen Abständen zeichnet, daß zwischen beiden Strahlen angenähert Quadrate entstehen. In einem Versuch erhält man die Kreisform der Kraftlinien dadurch, daß man einen senkrecht ausgespannten Draht durch ein wagerecht angebrachtes Blatt Papier zieht und während des Stromdurchganges auf das Papier Eisenfeilspäne streut.

Das Feld zweier paralleler gleich starker und gleichgerichteter Ströme zeigt angenähert Fig. 181, und zwar in der Ebene senkrecht zu den Drähten, wobei der gegenseitige Abstand der Drähte gering ist gegen ihre Länge. Das Bild wird versuchsweise durch Eisenfeilspäne oder zeichnerisch durch Zusammenstellung zweier Systeme nach Fig. 180 und Einzeichnung der resultierenden Feldrichtung erhalten. In der Nähe der Drähte umschließt jede Kraftlinie einen Draht. Die um einen Draht ohne Gegenwart des anderen kreisförmig verlaufenden Kraftlinien sind bei Gegenwart des anderen Drahtes durch Zug nach innen abgelenkt. In der Mitte zwischen beiden Drähten heben sich beide Wirkungen auf zur Feldstärke Null. In weiterem Abstand von den Drähten umschlingt jede Kraftlinie beide Drähte. Mit den Sätzen über die Wirkung der Kraftlinien* folgt, daß Fig. 181 das Bild der gegenseitigen Anziehung zweier paralleler gleichgerichteter Ströme darstellt. Die als dynamische Wirkung bezeichnete Kraftwirkung wird hierdurch als magnetische Wirkung erklärt.

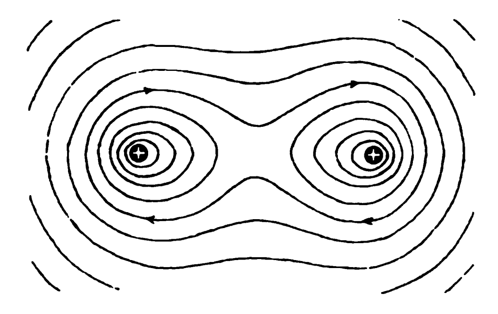


Fig. 181. Das Feld zweier gleichgerichteter Ströme.

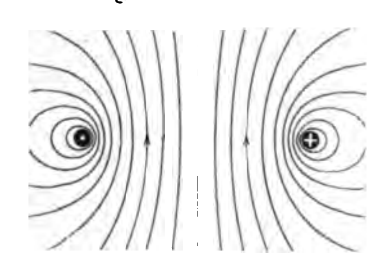


Fig. 182. Das Feld zweier entgegengerichteter Ströme.

* S. 195.

Das Feld zweier paralleller gleich starker entgegengerichteter Ströme zeigt Fig. 182. Es entsteht versuchsweise als Eisenfeilbild und zeichnerisch durch Zusammenstellung zweier Systeme nach Fig. 180, wobei nur der Kraftlinien-Richtungssinn des auf den Beschauer zu durchströmten Drahtes entgegen dem Uhrzeigerdrehsinn einzusetzen ist. Hier sind die geschlossenen Kraftlinienzüge der einzelnen Drähte nach außen gedrängt; die mittlere Kraftlinie läuft geradlinig und normal zur Ver-

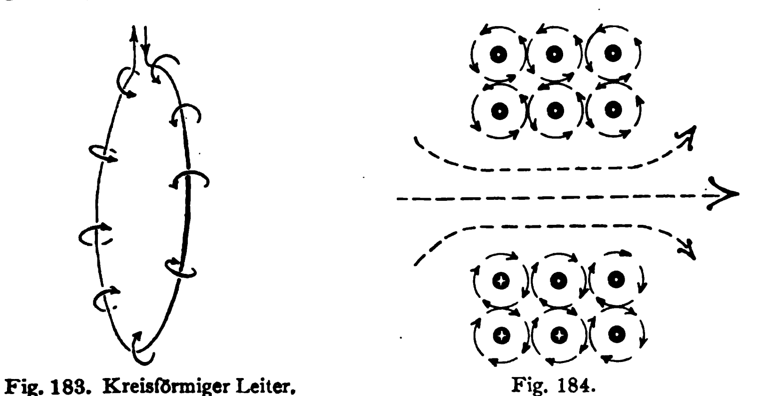


Fig. 183. Kreisförmiger Leiter. Fig. 184.

bindungslinie beider Drahtquerschnitte. Mit den Sätzen über die Wirkung der Kraftlinien* folgt, daß Fig. 182 das Bild der gegenseitigen Abstoßung zweier paralleler entgegengerichteter Ströme darstellt. Auch für diesen Fall wird hiermit die dynamische Wirkung als magnetische Wirkung erklärt.

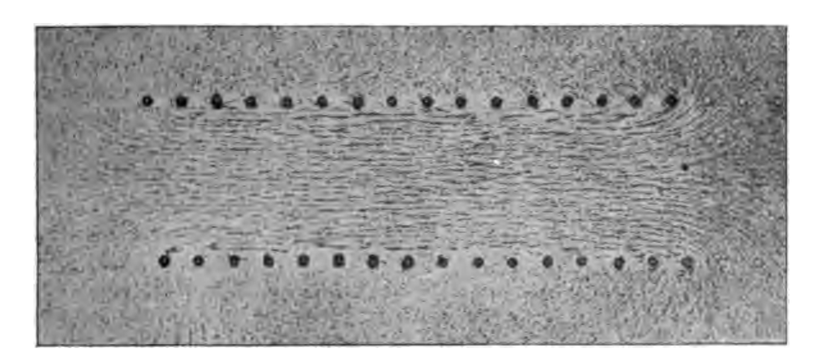


Fig. 185. Das Feld einer Spule.

Für das Feld eines kreisförmigen Leiters (Fig. 183) ist von Bedeutung, daß der Umfang der ganzen Stromschleife für die umflossene

* S. 195.

Fläche in demselben Sinne wirkt. In der Mitte des Reifens entsteht ein Raum, in dem das Feld nahezu homogen ist; dieser Satz wird um so richtiger, je kleiner die Abmessungen des betrachteten Raumes gegen diejenigen der Stromschleife sind. Sämtliche Kraftlinien einer Stromschleife treten normal zur Windungsebene durch die Schleife hindurch.

Eine Spule entsteht, wenn ein Draht mehrmals mit Windungen in demselben Sinn einen Hohlraum umgibt. Die magnetischen Wirkungen der einzelnen Windungen eines durch die Spule geleiteten Stromes addieren sich für den die Windungen umgebenden Raum,

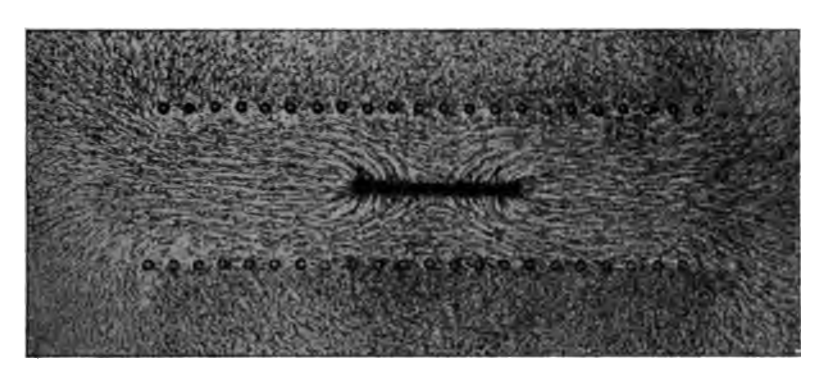


Fig. 186. Das Feld einer Spule mit Eisen im Inneren.

und somit auch für den umflossenen Hohlraum der Spule, während die Wirkungen der einzelnen Ströme sich für den Querschnitt des Wicklungsraumes zum Teil aufheben (Fig. 184). Fig. 185 ist die Wiedergabe eines mit Eisenfeilspänen erhaltenen Kraftlinienbildes einer durch ein Blatt Papier gezogenen geraden Spule. Das Feld ist für einen Teil des Hohlraumes nach Augenmaß homogen, während der Verlauf der Kraftlinien durch den Außenraum an die Kraftlinien eines geraden Magnetstabes erinnert. Die Kraftlinien suchen die Windungen der Spule axial zusammenzudrängen und radial auseinanderzutreiben.

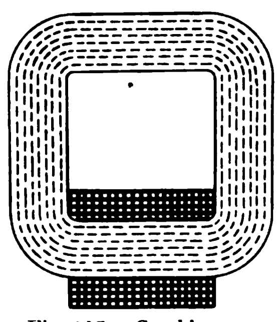


Fig. 187. Geschlossener magnetischer Kreis.

Bringt man weiches Eisen in die Spule, so wirkt das Eisen entsprechend der Fig. 186 zusammenziehend auf die Kraftlinien, und es treten die Erscheinungen auf, wie sie früher (S. 196) behandelt worden sind.

Geht ein in sich geschlossener Eisenkörper durch den Hohlraum einer Spule hindurch (Fig. 187), so verläuft die magnetische Strömungserscheinung im wesentlichen nur durch das Eisen und es treten nur wenige Kraftlinien aus, so daß der auf S. 195 angedeutete geschlossene magnetische Kreis

für den Hauptteil der Strömungserscheinung verwirklicht ist. Wegen der geringen Anzahl austretender Kraftlinien gegenüber dem gesamten magnetischen Fluß ist die entmagnetisierende Wirkung verschwindend.

§ 67. Induktionselektrizität im Zusammenhang mit der Kraftlinienvorstellung.

In Anknüpfung an § 18, B. III erweitern nachstehende Versuche die Vorstellung von der Induktionselektrizität:

1. Versuch (gerader Draht).

Ein Magnet *M* in Figg. 188 und 189 führt zwischen seinen Polen *N* und *S* eine Anzahl von Kraftlinien. Die Kraftlinien sind in ihrem Verlauf von oben nach unten gerichtet. Ihre Erzeugungsart ist beliebig (Stahlmagnet oder Elektromagnet). In dem Luftraum zwischen den beiden Polen befindet sich ein Draht *A B*, der in Fig. 188 nur als

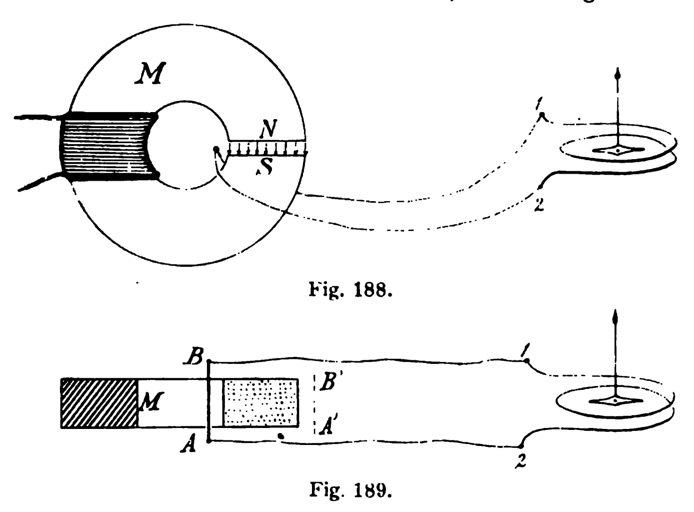


Fig. 188.

Fig. 189.

Punkt, in der Grundrißabbildung Fig. 189 seiner Länge nach zu sehen ist. In der letzteren Figur sind die Kraftlinien als Punkte gezeichnet und sollen in die Bildebene hineingerichtet sein.

Die Drahtenden *A* und *B* sind mit den Klemmen 1 und 2 eines Galvanometers verbunden, das aus einer durch den Strom ablenkbaren Magnetnadel und einer zugehörigen Spule bestehen möge. Der Zeiger des Galvanometers möge nach rechts ausschlagen, wenn an Klemme 1 der positive und an Klemme 2 der negative Pol einer Elektrizitätsquelle gelegt wird.

Befindet sich nun der Draht *A B* zunächst am weitesten nach links, so wie es die Figur zeigt, und wird der Draht dann schnell durch die Kraftlinien hindurch bewegt bis zur Lage *A' B'*, so zeigt das Galvanometer einen Ausschlag nach rechts. Liegt aber der Draht

zunächst bei $A' B'$ und wird er dann in entgegengesetzter Richtung bewegt als vorhin, so zeigt das Galvanometer einen Ausschlag nach links.

Dieser Versuch lehrt: Wenn ein Draht in einem magnetischen Felde bewegt wird, so daß er seiner Länge nach Kraftlinien schneidet, entsteht ein elektrischer Strom, wenn die Enden des Drahtes außerhalb des Feldes (in diesem Falle durch das Galvanometer) miteinander verbunden sind. Der Strom dauert nur so lange an, wie die Bewegung dauert.

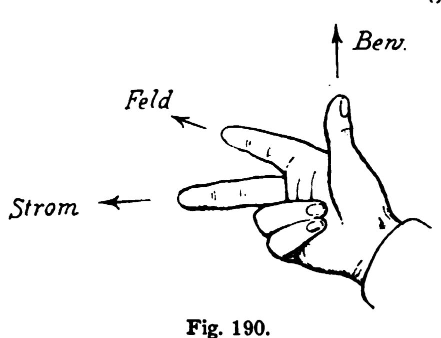


Fig. 190.

Bewegt man den Draht so, daß keine Kraftlinien geschnitten werden, dann bleibt die Erscheinung aus.

Eine Reihe von Versuchen der angegebenen Art mit beliebigen Kraftlinien- und Bewegungsrichtungen führt zu dem Ergebnis, daß die drei Richtungen von Feld, Bewegung und Strom die Achsen eines räumlichen Koordinatensystems bilden müssen, damit die Induktionserscheinung überhaupt auftritt. Die Erscheinung tritt am größten auf, wenn die Achsen der Feld-, Bewegungs- und Stromrichtung normal zueinander stehen; in anderen Fällen kommen die Komponenten nach diesen Richtungen hin in Frage.

Eine Handregel, bei der der Daumen, der Zeige- und der Mittelfinger zueinander normal einzustellen sind, gibt Aufschluß über den Zusammenhang der drei Richtungen:

Regel der rechten Hand: induzierter Strom! (Fig. 190.)

Man stellt den Zeigefinger der rechten Hand in Richtung der Kraftlinien und den Daumen in Richtung der Bewegung, so gibt der Mittelfinger die Richtung des induzierten Stromes an.

Die Umkehr von Feld- oder Bewegungsrichtung gibt Umkehr der Stromrichtung. Die Umkehr von Feld und Bewegung zugleich gibt Strom in unverändertem Sinn.

2. Versuch (bewegte einfache Schleife).

An Stelle des geraden Drahtes tritt hier eine Schleife, sonst ist die vorige Schaltung nicht geändert. Die Versuchsanordnung zeigt Fig. 191 im Grundriß. Die Kraftlinien verlaufen von oben nach unten, also an der Figur in die Bildebene hinein.

Die Schleife, die ursprünglich außerhalb des Kraftlinienstromes liegt, können wir an einer beliebigen Stelle ihres Umfanges in das Feld hineinführen, wir erhalten an jedem Teil des Umfanges, falls die Schleife nur nicht gewendet wird, die Wirkung in demselben Sinn. Vermehren wir durch die Bewegung der Schleife die Zahl der Kraftlinien inner-

halb des Umfanges, so erhalten wir einen Strom in Richtung der in Fig. 191 eingezeichneten Pfeile, vermindern wir durch die Bewegung der Schleife die eingeschlossene Kraftlinienzahl, so fließt ein Strom in umgekehrter Richtung. In dieser Figur sind, wie bei den folgenden, gefiederte Pfeile zur Bezeichnung einer Bewegung, glatte Pfeile zur Bezeichnung der Stromrichtung angewendet.

Wir wenden nun den Magnetismus, so daß die Kraftlinien von unten nach oben verlaufen. Jetzt erhalten wir bei Vermehrung der

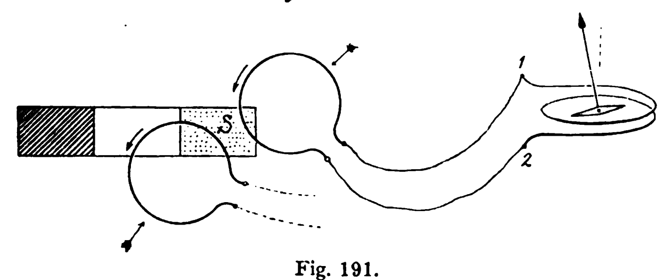


Fig. 191.

Kraftlinien innerhalb der Spule den Strom in umgekehrtem Sinn, gegenüber dem vorigen Versuch. Dasselbe beobachten wir bei Verringung der Kraftlinienzahl innerhalb der Schleife.

3. Versuch (feste, einfache Schleife).

Der Versuch setzt einen Elektromagneten voraus. Bei unterbrochenem Strom in der Wicklung des Magneten legen wir eine Schleife so, wie es Fig. 192 darstellt, wobei es darauf ankommt, daß die Schleife den Raum umgibt, der mit Kraftlinien durchsetzt werden soll.

Wir stellen nun durch Schließung des Magnetisierungsstromes das Feld her, so daß es von oben nach unten verläuft. Unmittelbar

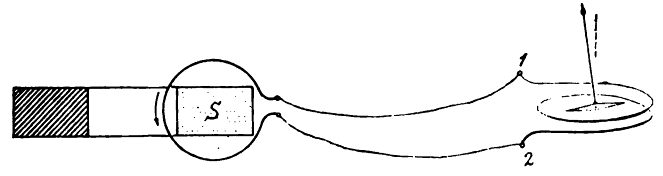


Fig. 192.

nach dem Stromschluß ist dabei ein Ausschlag des Galvanometerzeigers wahrzunehmen; der Strom fließt dabei in Richtung des Pfeiles in Fig. 192, d. h. in derselben Richtung, als ob die Spule von außen her in das Feld hineinbewegt worden wäre. Wegnahme des Feldes gibt entgegengesetzte Wirkung. Mit umgekehrter Feldrichtung ändern sich auch die Richtungen der Stromstöße.

Das Ergebnis dieses Versuches lautet: In einer Schleife, deren Enden durch einen Draht miteinander verbunden sind, wird ein Strom induziert, wenn sich innerhalb ihres Umfanges die Kraftlinienzahl

ändert. Die Richtung des Stromes ist dabei diejenige, die man erhalten würde, wenn die Schleife von außen in das Feld hineinbewegt worden wäre.

Wenn wir einen Kraftlinienstrom von bestimmter Richtung unterbrechen und dann einen solchen in entgegengesetzter Richtung erregen, so bekommen wir innerhalb der Schleife beidemal Stromstöße von derselben Richtung. Aus diesem Grunde verdoppelt sich die Wirkung, wenn der Strom in der Magnetwicklung plötzlich kommutiert wird.

Es ist zu beachten, daß bei allen bisherigen Versuchen dieses Paragraphen durch die Schließung des Stromkreises eine Schleife hergestellt wird.

4. Versuch (die Schleife mit mehreren Windungen).

Es wird eine Schleife mit mehreren Windungen in das magnetische zwischen den Polen des Ringes auftretende Feld hineinbewegt. Die Abbildung (Fig. 193) zeigt die Anordnung des Versuches. Es ist dort eine Schleife mit drei Windungen gezeichnet. Diejenigen drei Drähte,

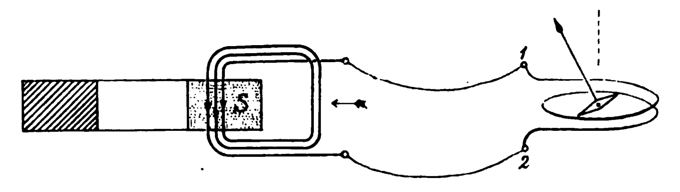


Fig. 193.

welche die Kraftlinien schneiden, sind durch die Führung der Windungen so miteinander verbunden, daß die Verbindungsdrähte der wirksamen Leiterteile außerhalb des Feldes liegen und einen fortlaufenden Richtungssinn aufweisen.

Der Versuch bringt das Ergebnis, daß die Stärke des Induktionsstromes bei Voraussetzung eines konstanten Widerstandes im Stromkreise gegen die früheren Versuche unter sonst gleichen Verhältnissen mit der Zahl der durch das Feld bewegten hintereinandergeschalteten Drähte wächst.

5. Versuch (Induktionsspannung als Ursache der Induktionsströme. Proportionalitäten).

In den Stromkreis der Fig. 193 sei ein veränderlicher Rheostat eingeschaltet. Die Spule ist auswechselbar gegen andere. Die vorhandenen Spulen bestehen aus vielen Windungen von bekannter Anzahl und von bekanntem Widerstande und seien durch eine mechanische Einrichtung langsam, aber mit konstanter einstellbarer Geschwindigkeit durch das Feld bewegt. Unter Einhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit und eines bestimmten Feldes stellen sich für eine bestimmte Spule die am Galvanometer*) ablesbaren Amperezahlen um-

* An Stelle des in Fig. 193 angedeuteten Instrumentes empfiehlt sich hier ein solches nach dem Deprez-d'Arsonval-System.

gekehrt ein, wie die Widerstände des Stromkreises. Daraus folgt, daß eine bestimmte Schnittgeschwindigkeit eine bestimmte elektromotorische Kraft erzeugt, die dasjenige ist, was in erster Linie durch die Induktionswirkung auftritt. Der erzeugte Induktionsstrom richtet sich nach der erzeugten Voltzahl und dem im Kreise vorhandenen Widerstand entsprechend dem Ohmschen Gesetz.

Beim Widerstande unendlich (unterbrochener Stromkreis) wird nur Spannung erzeugt, was durch Elektrometer nachgewiesen werden kann, die mit der gegenseitigen Kraftwirkung von Elektrizitätsmengen arbeiten. Bei sehr geringem Widerstande im Stromkreise kann auch bei geringer erzeugter Spannung der Induktionsstrom hohe Amperezahlen annehmen.

Eine Veränderung der eingestellten Geschwindigkeit ergibt eine zu ihr proportional veränderte EMK, sofern die Kraftlinienzahl unveränderlich bleibt. Unter Berücksichtigung dessen, daß auch die Feldstärke verändert werden kann, gilt:

Die durch Induktion erzeugte Voltzahl ist direkt proportional zu der Schnittgeschwindigkeit. Unter der Schnittgeschwindigkeit eines einzelnen Drahtes verstehen wir die von ihm in der Zeiteinheit geschnittene Kraftlinienzahl.

Jeder einzelne durch das Feld geführte Draht einer Spule ist als Einzelstromquelle aufzufassen, deren erzeugte Einzelspannungen durch die Spulenwindungen hintereinandergeschaltet werden, so daß auch mit Veränderung der Windungszahl unter sonst gleichen Verhältnissen die Induktionsspannung proportional zur Windungszahl wächst.

Es folgt daraus die Richtigkeit des Satzes, daß die erzeugte Voltzahl proportional zur Schnittgeschwindigkeit ist, auch für ganze Spulen und Spulensysteme. Es ist als die Schnittgeschwindigkeit des ganzen Kreises nur die Summe der Schnittgeschwindigkeiten seiner einzelnen Leiterteile einzusetzen, so daß z. B. eine Spule von z hintereinandergeschalteten Windungen die Schnittgeschwindigkeit gegen eine Windung ver-z-facht.

6. Versuch (Gegeneinanderschaltung von Induktionsspannungen).

Bei der Anordnung nach Fig. 194 schneiden zwei Drähte den Kraftlinienstrom, aber innerhalb desselben Feldes ist der Draht hin- und zurückgeführt. Bewegen wir diese Schleife, welche mit ihren

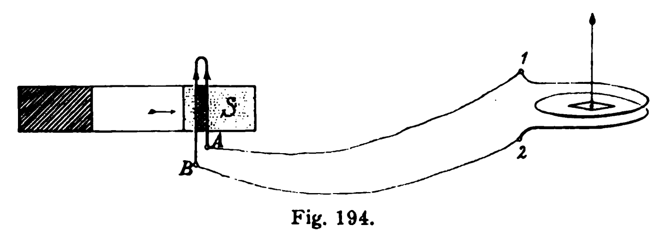


Fig. 194.

Enden A und B an die Klemmen 1 und 2 des Galvanometers angeschlossen ist, durch das Feld, so ist keine Wirkung wahrzunehmen.

Die Spannung, welche zwischen den Enden des ersten Drahtes entsteht, ist gegen die gleich große Spannung des zweiten Drahtes geschaltet. Die beiden Spannungen heben sich für den Stromkreis einander auf. Innerhalb der Schleife hat man während der Bewegung im Felde stets dieselbe durch die doppelt schraffierte Fläche ausgedrückte Kraftlinienzahl, was nach dem im Anschluß an den 3. Versuch Gesagten allein genügt zur Erzeugung der Wirkung Null.

Allgemein ist bei beliebigem Hintereinander- und Gegeneinanderschalten von Induktionsspannungen nach den Angaben von § 33 zu verfahren, indem die algebraische Summe der Spannungen, gleichviel wie sie erzeugt sind, zur Ermittlung der Stromstärke nach dem Ohmschen Gesetz in Frage kommt. Als die Schnittgeschwindigkeit eines Kreises ist allgemein die algebraische Summe der Schnittgeschwindigkeiten der einzelnen Leiterteile einzusetzen.

7. Versuch (die Magnetisierungsspule im Vergleich mit der Induktionsspule).

Wir schalten entsprechend Fig. 195 eine Spule *M*, die Magnetisierungsspule, mit einem Widerstand *W* in einen Stromkreis von einer beliebigen Gleichstromquelle aus. Eine zweite Spule *J*, die Induktionsspule, die keine elektrische Verbindung mit *M* hat, befindet sich im

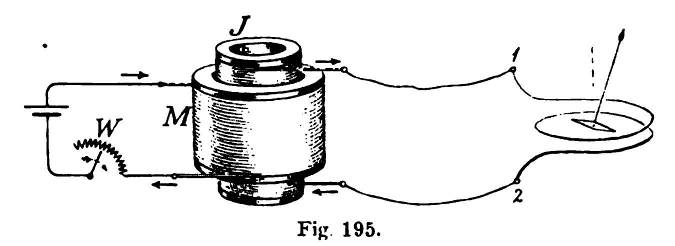


Fig. 195.

Inneren von *M*. Die Klemmen von *J* sind mit den Klemmen des Galvanometers verbunden.

Fließt der Strom in der äußeren Spule von oben gesehen in Richtung des Uhrzeigers, so ist nach bekannter Regel das Feld in der Spule von oben nach unten gerichtet. Würden wir nun die Induktionsspule von außen her in das Feld hineinbewegen, so gäbe das nach der Regel der rechten Hand in der Induktionsspule einen Strom entgegengesetzt der Uhrzeigerdrehung. In unserer Versuchsanordnung vermehren wir die Kraftlinien innerhalb der Induktionsspule durch Verstärkung des Stromes in *M* und erhalten dasselbe Ergebnis. Die Schwächung des Stromes in *M* gibt in *J* einen Induktionsstrom im Sinne der Uhrzeigerdrehung.

Allgemein gilt: Stecken zwei Spulen ineinander und fließt in der einen (primär) ein veränderlicher Strom, so wird an der zweiten (sekundär), so lange die Änderung dauert, Spannung induziert. Der Drehsinn des infolge dieser Spannung herstellbaren Induktionsstromes ist dem ent-

stehenden Primärstrom entgegen-, dem verschwindenden Primärstrom gleichgerichtet.

Dasselbe trifft auch in jedem Fall zu, wenn durch andere Anordnung (z. B. mit Hilfe eines Eisenkernes) dafür gesorgt ist, daß ein magnetischer Kraftfluß durch den Hohlraum beider Spulen geleitet wird.

Auf dieser Erscheinung beruhen die primär mit intermittierendem Gleichstrom arbeitenden und sekundär Wechselstrom abgebenden Induktionsapparate, sowie die beiderseits Wechselstrom führenden Transformatoren. Das Übersetzungsverhältnis der Spannung wird durch entsprechende Bemessung der primären und sekundären Windungszahlen erreicht.

Die Rolle der inneren und äußeren Spule als Magnetisierungs- und Induktionsspule ist vertauschbar. Wir sind berechtigt das Entstehen von Kraftlinien bei einer Spule mit steigendem Strome anzusehen, als gingen die in sich geschlossenen Kraftlinienzüge vom Inneren des Wicklungsquerschnittes aus und als erweiterten sie sich in der Umgebung des Wicklungsraumes, wo sie mit steigendem Strome durch die neu dazu kommenden Kraftlinien immer mehr zusammengedrängt werden.

Entsprechend dieser Vorstellung ist auch der Rückwärtsgang der Kraftlinien in das Innere des Wicklungsquerschnittes hinein zu denken für den Fall des abnehmenden Stromes.

8. Versuch (die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld).

Durch das Feld des Magneten M (Fig. 196), dessen Kraftlinien in die Bildebene hinein verlaufen, fließt von einer Gleichstromquelle her in einem beweglichen Draht ein Strom in Richtung von A nach B. Es zeigt sich in der angegebenen Anordnung dabei eine den Draht nach oben treibende Kraft. Durch Umkehr der Stromrichtung im Draht oder durch Umkehr der Feldrichtung bekommt die Kraft umgekehrten

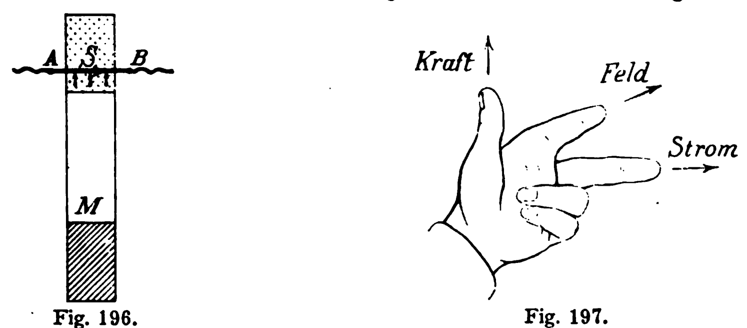


Fig. 196. Fig. 197.

Richtungssinn. Umkehr von Strom und Feld zugleich gibt Kraftwirkung wie im ersten Fall.

Die Kraftwirkung hat ihren Höchstwert, wenn die Feld-, Strom- und Kraftrichtungen zueinander normal stehen wie die Achsen eines räumlichen rechtwinkligen Koordinatensystemes; in anderen Fällen kommen die Komponenten nach diesen Richtungen hin in Frage.

Eine Handregel, bei der der Daumen, der Zeige- und der Mittelfinger zueinander normal einzustellen sind, gibt Aufschluß über den Zusammenhang der drei Richtungen:

Regel der linken Hand: Kraft zwischen Strom und Feld! (Fig. 197.)

Man stellt den Zeigefinger der linken Hand in Richtung des Feldes und den Mittelfinger in Richtung des Stromes, so gibt der Daumen die Richtung der Kraftwirkung an.

Die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld ist zu deuten durch die Ablenkung der ursprünglich vorhandenen Kraftlinien durch die Wirkung des Stromes. So z. B. gibt Fig. 198 die wirklich vorhandenen Linien, herauskonstruiert aus dem ursprünglichen homogenen Feld und den kreisförmigen Linien des im Querschnittt gezeichneten Stromleiters. Die seitliche Kraft P ist die Resultante sämtlicher Kräfte (vgl. S. 195) des resultierenden Kraftliniensystemes.

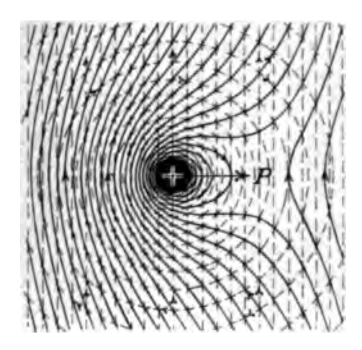


Fig. 198.

Eine Vergrößerung der Feldstärke bei konstantem Strome und eine Vergrößerung des Stromes bei konstantem Felde gibt, wenn alles übrige gleich bleibt, proportional vergrößerte Kraftwirkung.

Für beliebige Fälle gilt: die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld ist proportional zum Produkt aus der Feldstärke, der Stromstärke und der wirksamen im Felde liegenden Drahtlänge.

Für mehrmalige Durchquerung von Feldern gilt die algebraische Summe der Einzelleiterkräfte als Gesamtkraft, oder was dasselbe heißt: zur Ermittlung der wirksamen Länge ist zu unterscheiden, nach welcher Richtung die Kräfte wirken, und dementsprechend sind die wirksamen Einzelstrecken algebraisch zu addieren.

Auch wenn der Strom in Form eines Lichtbogens quer durch ein magnetisches Feld geleitet wird, tritt diese Kraftwirkung auf. Magnete, die den Zweck haben, auf einen Lichtbogen eine richtende Kraft auszuüben, heißen Richtmagnete, Blasmagnete oder Bläser. Schwache Blaswirkung wird bei Bogenlampen mit schrägen Kohlen verwendet. Bei starker Blaswirkung reißt der Lichtbogen ab. Diese Erscheinung findet Verwendung bei Ausschaltern bis zu recht hohen Leistungen, wobei der Raumbedarf dieser Ausschalter gering sein kann.

9. Versuch (die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld bei Induktionselektrizität).

Im Anschluß an den 5. Versuch dieses Paragraphen wurde darauf hingewiesen, daß bei der Bewegung eines Leiters quer durch ein Feld eine Spannung erzeugt wird. Die Stromstärke stellt sich ein je nach

der erzeugten Spannung und dem vorhandenen Widerstand des Schließungskreises. Das Produkt aus Stromstärke und Spannung drückt eine Leistung aus. Zu dieser Leistung muß nach dem Gesetz von der Erhaltung der Arbeit auch eine Gegenleistung gehören. Worin die Gegenleistung besteht, läßt folgender Versuch erkennen (Fig. 199):

Eine Spule *abcd* aus mehreren Windungen werde in sich geschlossen und leicht angefaßt. Führt man sie durch das Feld, so empfindet man eine bei der Bewegung zu überwindende Kraftwirkung, als würde ein Körper durch eine dicke Flüssigkeit bewegt. Die Kraftwirkung ist nicht vorhanden, wenn Anfang und Ende der Spule voneinander isoliert sind.

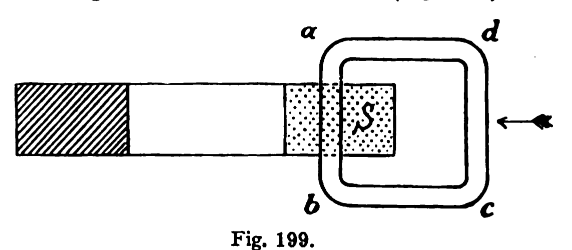


Fig. 199.

Die hier auftretende Kraftwirkung ist derselben Art, wie sie im 8. Versuche mit einem beliebig erzeugten Strome erkännt wurde. Hier wird der Strom nach der Regel der rechten Hand induziert, während er seine Kraftwirkung nach der Regel der linken Hand ausübt. Die durch die Bewegung erzeugte Kraftwirkung ist in jedem Falle der Bewegung des Leiters entgegengesetzt.

Das Produkt aus der hier auftretenden Kraft und der räumlichen Geschwindigkeit ist die aufgewendete Leistung, die Multiplikation der entstehenden Volt- und Amperezahl ergibt die ihr äquivalente, in elektrischer Form auftretende Gegenleistung, die in diesem Fall in den Windungen der Spule sich in Wärme umsetzt.

Die Kraftwirkung zwischen Induktionsstrom und Feld befolgt ähnliche Gesetze, wie sie bei der Bewegung von Körpern durch Flüssigkeiten auftreten: Die Kraftwirkung ist Null bei der Bewegung Null, während mit steigender Geschwindigkeit die Kraftwirkung in beiden Fällen wächst. Im Falle der Induktionserscheinung wächst nach den bisher angegebenen Gesetzmäßigkeiten bei einer und derselben Versuchsanordnung die widerstehende Kraft proportional zur räumlichen Geschwindigkeit, und zwar gemessen in ihrer Komponente in der Richtung quer zu den Kraftlinien. Die Leistung wächst demnach bei konstantem Widerstande des Kreises proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit.

10. Versuch (Wirbelströme).

Bewegt man durch ein magnetisches Feld eine zusammenhängende Metallmasse derart, daß zwischen den durch Induktion entstehenden Polen sich außerhalb des Feldes ein Schließungskreis bildet, so haben die entstehenden Induktionsströme keine bestimmten vorgeschriebenen Bahnen mehr, sie bilden vielmehr Wirbel und heißen daher Wirbel-

ströme. Da sie in gut leitendem massiven Material wenig Widerstand für ihren Stromkreis vorfinden, treten sie mit erheblicher Stärke und deutlich wahrnehmbaren Gegenkräften auf, d. h. die Bewegung wird stark gedämpft und die bei der Dämpfung auftretende Arbeit in Wärme umgesetzt. Die Erscheinung ist von Foucault [Hist. 33] entdeckt worden (Wirbelströme = Foucaultströme).

Zum Nachweis der Wirbelströme dient folgende Anordnung (Fig. 200).

Der massive, aus dickem Kupferblech bestehende Sektor *abcd* ist pendelnd aufgehängt, so daß er durch das Feld eines Elektromagneten hindurchstreichen kann, während Teile von ihm oben und unten über den mit Kraftlinien durchsetzten Raum vorstehen. Bei unerregtem Magneten pendelt er nach einem Anstoß lange hin und her, während er sich bei erregtem Magneten langsam seiner tiefsten Lage nähert. Wird an Stelle des zusammenhängenden Metalles ein Sektor aus einzelnen nach Fig. 201 *a* oder *b* angeordneten und voneinander

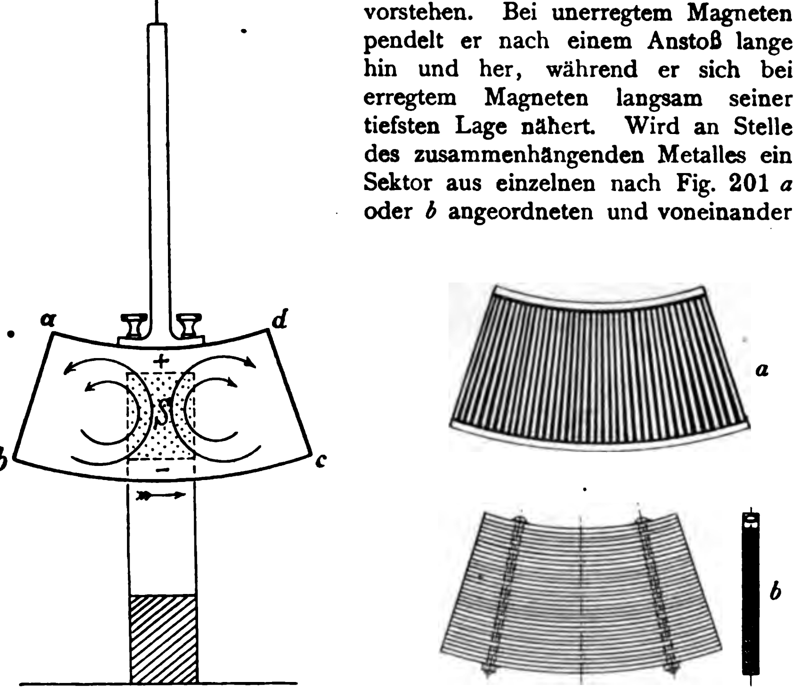


Fig. 200. Waltenhofensches Pendel. Fig. 201.

isolierten Blechen (Lamellen) angewendet, so schwingt der Sektor auch bei erregtem Felde weiter. Die Zerteilung ist so vorzunehmen, daß die Induktionsstromkreise nicht, oder wenigstens auf langen Wegen mit geringen Querschnitten in sich geschlossen werden. Ein anderes Mittel zur Vermeidung von Wirbelströmen, als die Unterteilung der Metallmassen, gibt es nicht.

Wirbelströme treten auch bei ruhenden Teilen an Wechselstromspulen auf. Eisenkerne an Wechselstrommagneten sind daher zu unterteilen, metallene Spulenhülsen sind vor der Bewicklung durch einen

Sägeschnitt bis in den inneren Hohlraum hinein aufzuschlitzen. Bolzen zum Zusammenhalten der Eisenbleche bei Spulenkernen sind gegen das Eisen zu isolieren.

11. Versuch (Selbstinduktion).

Eine einzige, von einem veränderlichen Strome durchflossene Spule ist, wie die Induktionsspule des 7. Versuches, während der Stromänderung einer Induktionsspannung ausgesetzt. Ein entstehender oder ein sich vergrößernder Strom erzeugt an der Spule eine Spannung, die bestrebt ist dem entstehenden Strome einen Induktionsstrom entgegenzuschicken. Ein verschwindender oder ein sich verringernder Strom erzeugt an der Spule eine Spannung, die bestrebt ist, dem verschwindenden Strom einen Induktionsstrom in gleicher Richtung nachzuschicken.

Da die Induktion auf den einzig vorhandenen Stromkreis selbst ausgeübt wird, heißt die Erscheinung die Selbstinduktion.

Nach den Bemerkungen am Schluß des 7. Versuches, betreffend das Entstehen und Verschwinden von Kraftlinien an einer Spule, ist klar, daß die Windungen von den entstehenden oder verschwindenden Kraftlinien geschnitten werden, und zwar so, daß in allen Windungen Spannung in demselben Drehsinn erzeugt wird. Denken wir uns eine Spule an einer beliebigen Stelle ihres Umfanges von außen her in das sie künftig durchsetzende Kraftliniensystem hineinbewegt, so erhalten wir nach der Regel der rechten Hand die Richtung der Selbstinduktionsspannung, und zwar in diesem Fall entgegen dem Strome, der das vorliegende Feld erzeugen würde. Das entsprechende gilt für das Verschwinden der Kraftlinien, das gleichbedeutend ist mit dem Fall, als ob die Spule aus dem feststehend gedachten Kraftliniensystem radial herausbewegt würde: Es entsteht nach der Regel der rechten Hand eine Spannung, die bestrebt ist einen Strom im Sinne des verschwindenden Stromes zu erzeugen.

Die Erscheinung gilt auch, nur zunächst in bedeutend geringerem Maße, für einen einzigen, z. B. gerade ausgespannten Draht, bei dessen Anschluß durch die Entstehung der kreisförmigen (Fig. 180) Kraftlinien dieselbe Induktionswirkung auftritt, als wenn der Draht von außen her in das ihn umgebende Kraftliniensystem hineingebracht worden wäre. Die Vorstellung des Herausbewegens ergibt die beim Verschwinden des Stromes auftretende Richtung der Induktionswirkung.

Die Folge der Selbstinduktionserscheinung besteht bei Gleichstrom darin, daß ein Leiter im ersten Augenblick nach dem Anschließen noch nicht von demjenigen Strome durchflossen ist, der dem Ohmschen Gesetz entspricht, wenn nur die elektromotorische Kraft der Gleichstromquelle und der Widerstand des Kreises berücksichtigt werden, sondern daß der Strom allmählich ansteigt, zuerst schnell, dann immer langsamer, und sich mathematisch genommen erst nach unendlich langer Zeit zu seinem Grenzwert steigert. Die Selbstinduktionsspannung mit steigendem Strome bildet eine elektromotorische Gegenkraft zu der EMK

der Gleichstromquelle. Wird der Stromkreis unterbrochen, so strebt Elektrizität von der Spule aus nachzufließen, und zwar in Richtung des vorherigen Stromes. Da der Stromkreis aber offen ist, entsteht zwischen den Spulenenden Spannung, die höher sein kann, als die Spannung der Gleichstromquelle. Zudem sind bei der Unterbrechung die Gleichstromspannung und die Selbstinduktionsspannung hintereinandergeschaltet. Die bei Unterbrechung von Kreisen mit großer Selbstinduktion* entstehende recht hohe Spannung sucht Auswege durch die Isoliermaterialien und führt bei den Spulen zur Neigung zum Durchschlagen. Die Selbstinduktionsspannung wird um so höher, je besser die Spulenenden voneinander isoliert sind, und je weniger Wirbelströme bei dem Vorgang auftreten.

Eine Unterbrechung solcher Kreise ist daher in den meisten Fällen den Wicklungen unzuträglich und deshalb zu vermeiden. Erfolgt die Unterbrechung so, daß man den einen Kontakt in der einen, den anderen Kontakt in der anderen Hand hält, während zwischen beiden Händen sich die Unterbrecherstelle bildet, so können bei großer Selbstinduktion lebensgefährliche Spannnungen auftreten, auch wenn die Spannung der Gleichstromquelle gering ist.

Die ganze Erscheinung erinnert daran, als wäre der Strom durch das ihn umgebende Kraftliniensystem mit Masse behaftet.

---

a) Die Wirkungen der Selbstinduktion bei Gleichstrom werden erkennbar durch eine in Fig. 202 schematisch gezeichnete Anordnung. Darin bedeutet S eine Gleichstromquelle (Akkumulatoren), U einen Unterbrecher, A einen Strommesser mit sehr leichtem Zeigersystem, Sp eine aus vielen Windungen bestehende große und mit viel in sich geschlossenem Eisen durchsetzte Spule, V einen Spannungsmesser nach dem Weicheisensystem** (vgl. § 98). An Stelle der Spule ist es auch möglich, einen gewöhnlichen Drahtwiderstand gleicher Ohmzahl zu setzen. Mit letzterem fangen wir an und zeigen, daß der Ausschlag von A beim Einschalten schnell zu seinem Endwert wächst, und daß beim Abschalten der Zeiger des Spannungsmessers von seiner Ruhestellung aus sofort der Null zustrebt. Tritt an Stelle des gewöhnlichen Widerstandes die Spule, so steigt der Strom träge (im Verlauf mehrerer Sekunden) an, während nach dem Unterbrechen der Zeiger des Spannungsmessers erst zu höheren Voltzahlen ausschlägt, ehe er der Null zustrebt. Der Unterbrecherlichtbogen ist

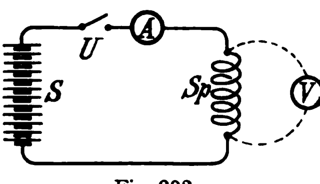


Fig. 202.

* Siehe Nebenschlußwicklungen an den Maschinen.

** Weil es unabhängig ist von der Polarität und nicht träge, wie die Hitzdraht-Instrumente; ein Deprez-Instrument würde Ausschlag nach zwei Seiten beanspruchen.

bei dem gewöhnlichen selbstinduktionslosen Widerstand klein, während er unter Verwendung der Spule auffällig groß auftritt.

b) Eine Schaltung nach Fig. 203 ermöglicht es, die Spule vor der Abschaltung unter Vermeidung eines Kurzschlusses von S in sich zu schließen.

Der Widerstand W besitzt eine Kurbel, die in Ausschaltstellung zum Verbinden der Spulenenden auf einem von der übrigen Kontaktbahn isolierten Knopf K steht, der mit dem jenseitigen (—) Ende der Spule verbunden ist, während das diesseitige Ende (+) der Spule unter Einschaltung eines Strommessers an den Kurbeldrehpunkt D angeschlossen ist. Der Draht vom Pluspol der Stromquelle aus führt zu E, d. h. zu der Eintrittstelle in die Spiralen des Widerstandes; W ist so bemessen, daß für den Augenblick der Zwischenstellung der Kurbel vor dem Ausschalten der über +, E, W, K zu — gehende Strom nicht zu stark wird. Führt man plötzlich die Kurbel von K aus auf E, so steigt der Ausschlag am Strommesser in der bereits erwähnten Weise langsam an; führt man die Kurbel plötzlich von E aus auf K zurück, so geht der Zeiger langsam auf Null zu, d. h. es fließt ein dem ursprünglichen gleichgerichteter Strom von der Spule aus (von -+- über K, D, A zu ---) nach und die an den Spulenenden auftretenden Elektrizitätsmengen gleichen sich durch diesen Strom aus. Es entsteht daher auch nicht die hohe Selbstinduktionsspannung und die Neigung zum Durchschlagen der Spulenisolation (funkenlose Abschaltung). Der Zeiger des Spannungsmessers strebt nach dem Abschalten sofort der Null zu.

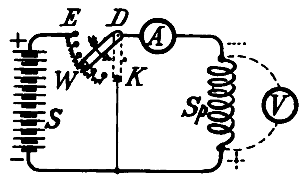


Fig. 203.

Mit diesen Betrachtungen erledigt sich vorläufig die Lehre von der Wirkungsweise der „Drosselspulen" bei Blitzschutzvorrichtungen, solange nicht eine oszillatorische Entladung vorliegen soll. Der Name Drosselspule für eine Selbstinduktionsspule rührt davon her, daß sie plötzliche Stromänderungen aufzuhalten sucht.

Die Wirkung der Selbstinduktion bei Wechselstrom ist im Wechselstromgebiet (Kapitel 14) behandelt.

§ 68. Einleitung in das absolute Maßsystem.

A. Vorbemerkung.

Die drei Grundgrößen für das absolute Maßsystem[Hist. 34 und 35] sind Länge, Masse und Zeit. Aus den Grundgrößen läßt sich auf Grund der bestehenden Gesetze jede andere technisch vorkommende Größe bestimmen. Die aus den Grundeinheiten nach den betreffenden Ge-

setzen abgeleiteten Einheiten für andere Größen heißen die absoluten Einheiten.

Die absolute Einheit für die Länge (als Formelgröße l) ist das cm; die Einheit für die Masse (als Formelgröße m) ist diejenige von 1 ccm Wasser seiner größten Dichte (bei 4 Grad) und heißt das Massengramm (geschrieben 1 gr); die Einheit für die Zeit (als Formelgröße t) ist die Sekunde.

B. Geschwindigkeit.

Auf Grund dieser Einheiten folgt für die Geschwindigkeit nach dem Gesetz:

Geschwindigkeit = Weg in der Zeiteinheit

$$v = \frac{l}{t}$$

als Einheit diejenige von 1 cm in der Sekunde.

Eine Geschwindigkeit muß stets eine Länge im Zähler und eine Zeit im Nenner haben. Die Art der Zusammensetzung einer Größe aus den Grundgrößen heißt die Dimension einer Größe. Die Bezeichnung der Dimension erfolgt durch Einsetzen der Formelgrößen in eckige Klammern. Der Satz: „Die Dimension der Geschwindigkeit ist gleich der Dimension einer Länge dividiert durch die Dimension einer Zeit“ wird daher geschrieben:

$$[v] = [l \cdot t^{-1}].$$

Entsprechend den Dimensionen setzen sich auch die Einheiten zusammen:

$$1 \text{ abs. Geschwindigkeitseinheit} = 1\ [\text{cm} \cdot \text{Sek.}^{-1}].$$

C. Beschleunigung.

Aus dem Gesetz:

Beschleunigung = Geschwindigkeitszunahme in der Zeiteinheit

$$a = \frac{v}{t} = \frac{l}{t^2}$$

folgt:

$$[a] = [l \cdot t^{-2}]$$

und:

$$1 \text{ abs. Beschleunigungseinheit} = 1\ [\text{cm} \cdot \text{Sek.}^{-2}];$$

oder in Worten: Ein Körper besitzt die Beschleunigung 1, wenn in 1 Sekunde seine Geschwindigkeitsvermehrung 1 cm/Sek. beträgt.

D. Kraft.

Aus dem Gesetz:

Kraft = Masse · Beschleunigung

$$P = m \cdot a$$

folgt, wenn die Dimension der Beschleunigung eingesetzt wird:

$$[P] = [l \cdot m \cdot t^{-2}]$$

und:

$$1 \text{ abs. Krafteinheit (1 Dyn)} = 1\,[\text{cm} \cdot \text{gr} \cdot \text{Sek.}^{-2}];$$

oder in Worten: Die Kraft 1 (1 Dyn) beschleunigt die Masseneinheit um 1 cm/Sek.².

Zum Vergleich mit dem technischen Maßsystem diene:

Die an 1 ccm Wasser angreifende Schwerkraft (1 Gewichtgramm oder 1 g) beschleunigt die Masse dieses Wassers um den Wert der Erdbeschleunigung, der in der Nähe des 50. Breitengrades etwa zu 981 cm/Sek.² gerechnet werden kann. Mit dieser Zahl ergibt sich nach der obigen Festlegung, daß 1 Dyn für die Annäherung zu $^1/_{981}$ g gesetzt werden kann und der Größenordnung nach einem mg nahekommt. Das gewöhnliche technische Maßsystem nimmt die Erdbeschleunigung als eine konstante Zahl hin und enthält dadurch eine Ungenauigkeit. Eine sehr feine Federwage würde angeben, was der Tatsache entspricht, daß ein und derselbe Gewichtstein am Pol schwerer ist, als am Äquator. Das absolute Maßsystem ist von der Erdbeschleunigung frei und deshalb wissenschaftlich richtig. Geht man von den absoluten Einheiten oder den auf ihnen beruhenden später vorkommenden Einheiten zu dem gewöhnlichen technischen Maßsystem über, so muß daher stets die Erdbeschleunigung in der Übergangskonstanten enthalten sein.

E. Arbeit.

Nach dem Gesetz:

$$\textit{Arbeit} = \textit{Kraft} \cdot \textit{Weg}$$

$$A = P \cdot l$$

folgt, wenn die Dimension der Kraft eingesetzt wird:

$$[A] = [l^2 \cdot m \cdot t^{-2}]$$

und:

$$1 \text{ abs. Arbeitseinheit (1 Erg)} = 1\,[\text{cm}^2 \cdot \text{gr} \cdot \text{Sek}^{-2}];$$

oder in Worten: Wirkt in Richtung eines Weges von 1 cm Länge die Kraft eines Dyn, so beträgt die dabei auftretende Arbeit 1 Erg.*

F. Leistung.

Nach dem Gesetz:

$$\textit{Leistung} = \textit{Arbeit in der Zeiteinheit}$$

$$L = \frac{A}{t}$$

folgt, wenn die Dimension der Arbeit eingesetzt wird:

$$[L] = [l^2 \cdot m \cdot t^{-3}]$$

und:

$$1 \text{ abs. Leistungseinheit (1 Erg/Sek.)} = 1\,[\text{cm}^2 \cdot \text{gr} \cdot \text{Sek.}^{-3}];$$

* Es liegt nahe, die Einheit der Arbeit als ein Dynzentimeter zu bezeichnen, dieser Name ist jedoch für die abs. Einheit des statischen Momentes eingeführt.

oder in Worten: Wirkt in Richtung der Geschwindigkeit von 1 cm/Sek. die Kraft 1 Dyn, so beträgt die dabei auftretende Leistung 1 Erg in der Sekunde.

Für das praktische elektrotechnische Maßsystem gilt:

$$1 \text{ Watt} = 10^7 \text{ Erg/Sek.}$$

G. Magnetische Polstärke.

Auf Grund des Coulombschen Gesetzes (vgl. § 6β):

$$P = c \cdot \frac{\mathfrak{m}_1 \cdot \mathfrak{m}_2}{r^2}$$

kann die Einheit des Magnetpoles festgelegt werden. Wirken zwei gleiche Magnetpole der Stärke $\mathfrak{m}$ aufeinander, so wird:

$$P = c \cdot \frac{\mathfrak{m}^2}{r^2}.$$

Der radiale Abstand r hat die Dimension einer Länge; die Konstante c ist* unbenannte Zahl und kann je nach dem Maßsystem beliebig gewählt werden. Setzen wir $c = 1$ und drücken wir P in Dyn und r in cm aus, so ist dadurch die Polstärke in das absolute Maßsystem eingeführt; aus

$$[\mathfrak{m}^2] = [l^2 \cdot P] = [l^3 \cdot m \cdot t^{-2}]$$

folgt:

$$[\mathfrak{m}] = [l^{\frac{3}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-1}]$$

und:

$$1 \text{ Polstärkeneinheit} = 1\,[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sek.}^{-1}]$$

oder in Worten: Der Einheitspol ist derjenige, der auf einen zweiten Pol gleicher Stärke in 1 cm Abstand die Kraft 1 Dyn ausübt.

H. Feldstärke.

Wird ein beliebiger Magnetpol $\mathfrak{m}$ in ein magnetisches Feld gebracht, so wirkt auf ihn parallel zu den Kraftlinien eine Kraft

$$P = c \cdot \mathfrak{m} \cdot \mathfrak{H},$$

wobei $\mathfrak{H}$ nach einem bisher noch nicht angenommenen Maßstab die Zahl der auf die Querschnittseinheit gedachten Kraftlinien und c eine unbenannte zu dem Maßsystem gehörige Konstante bedeutet. Daraus folgt zunächst

$$[\mathfrak{H}] = [P : \mathfrak{m}] = [l^{-\frac{1}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-1}];$$

unter Einsetzung der Grundmaße des absoluten Systemes folgt:

$$1 \text{ abs. Feldstärkeneinheit} = 1\,[\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sek.}^{-1}];$$

oder in Worten: Unter der Feldstärke 1 verstehen wir einen Raum, in dem auf den Einheitspol die Kraft von 1 Dyn ausgeübt wird.

* Da der Einfachheit wegen das (wissenschaftlich unvollkommene) dreidimensionale System beibehalten sein möge.

Zu der Kraftlinie als Maßgröße sei bemerkt: Die Einheit der Feldstärke wird ausgedrückt durch 1 Kraftlinie auf 1 qcm Querschnitt. Die Zahl der gedachten Linien steigt mit der auf den Einheitspol ausgeübten Dynzahl, indem z. B. dort, wo auf den Einheitspol eine Kraft von 300 Dyn ausgeübt wird, 300 Kraftlinien auf das Quadratzentimeter zu denken sind. Die Zahl der Kraftlinien auf das Quadratzentimeter bildet das absolute Maß für die Feldstärke (z. B. $\mathfrak{H} = 300$ Krftl./qcm). Von dem Einheitspol gehen, da eine Kugel vom Radius 1 cm eine Oberfläche von 4π qcm hat, $4\pi = 12{,}566$ Kraftlinien aus. Für ein homogenes Feld ist $\mathfrak{H}$ konstant.

Zur Vorstellung über Feldstärken diene: Die in der Wagerechten gemessene Feldstärke des Erdmagnetismus beträgt gegenwärtig für Mitteldeutschland etwa 0,1888 Krftl./qcm, während die Erdfeldstärke in Richtung der Inklinationsnadel gemessen sich auf etwa 0,470 Krftl./qcm beläuft.

Ohne künstliche Kühlung sind im Innern von Spulen ohne Eisen für kurze Zeit Feldstärken von etwa 300 Krftl./qcm leicht herstellbar.

An Stelle der Bezeichnung „Kraftlinien auf das Quadratzentimeter" findet sich auch die Bezeichnung „Gauß". An Stelle der Kraftlinien in obiger Festlegung spricht man auch von Einheitslinien, nur mit dem Unterschiede, daß diese Bezeichnung auch für den Verlauf der magnetischen Strömung durch Eisen gültig ist. Die Einheitslinie bildet streng genommen eine Kraftröhre.

I. Kraftfluß.

Nimmt das Feld der Stärke $\mathfrak{H}$ einen überall normal zu den Kraftlinien zu rechnenden Querschnitt von q qcm ein, so ist die gesamte, durch den Querschnitt gehende Kraftlinienzahl:

$$\mathfrak{N} = q \cdot \mathfrak{H};$$

die Gesamtzahl der einen bestimmten Raum durchsetzenden Einheitslinien wird bezeichnet als der Kraftfluß. Er hat dieselbe Dimension wie die Polstärke:

$$[\mathfrak{N}] = [l^2 \cdot \mathfrak{H}] = [l^{\frac{3}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-1}];$$

sowohl eine Polstärke, wie ein Kraftfluß, wird daher auch gemeinsam bezeichnet als eine magnetische Menge.

Es ist zu beachten, daß die Polstärke 1 mit 4π Kraftlinien gleichwertig ist.

J. Stromstärke.

Nach dem Gesetz von Biot[Hist. 25] und Savart übt (vgl. Fig. 204) ein Strom der Stärke i mit einem kleinen, durch l bezeichneten Teile seines Laufes auf einen im Abstande r von diesem Leiterteil entfernten Magnetpol der Stärke $\mathfrak{m}$ eine Kraft aus:

$$P = c \cdot \frac{\mathfrak{m} \cdot l \cdot i \cdot \sin\alpha}{r^2},$$

wobei α den zwischen der Stromrichtung dieses Teiles und der Verbindungslinie mit $\mathfrak{m}$ auftretenden Winkel bedeutet. Die Kraft P greift an $\mathfrak{m}$ normal zur Ebene von α an. Für einen beliebig langen und beliebig geformten Stromlauf wirkt nach Größe und Richtung die Resultante der von den einzelnen Leiterteilen ausgehenden Einzelkräfte.*

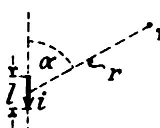


Fig. 204.

Aus obiger für ein Stromleiterelement gebildeten Gleichung für die Elementarkraft ist es bereits möglich, die Dimension des elektrischen Stromes zu bestimmen. Dabei ist zunächst zu berücksichtigen, daß nach Absatz H dieses Paragraphen

$$[P:\mathfrak{m}] = [\mathfrak{H}]$$

ist. Da weiterhin c und $\sin\alpha$ unbenannte Zahlen sind, gilt:

$$[\mathfrak{H}] = [i:l]$$

und:

$$[i] = [\mathfrak{H}\cdot l] = [l^{\frac{1}{2}}\cdot m^{\frac{1}{2}}\cdot t^{-1}];$$

wird $\mathfrak{H}$ und l in absoluten Einheiten ausgedrückt und $\alpha = 90^0$ gesetzt, so daß $\sin\alpha = 1$ ist, so bestimmt sich die absolute Einheit der Stromstärke:

$$1 \text{ abs. Stromeinheit} = 1\,[\text{cm}^{\frac{1}{2}}\cdot \text{gr}^{\frac{1}{2}}\cdot \text{Sek.}^{-1}];$$

oder in Worten:

Die absolute Einheit besitzt derjenige Strom, der bei 1 cm Länge im Normalabstande 1 cm die absolute Feldeinheit herstellt.

Nach dieser Festlegung kann auch die zweite an ihre Stelle treten:

Die absolute Einheit der Stromstärke ist vorhanden, wenn zwei parallele Leiterteile von je 1 cm Länge, deren Stromrichtung normal zur Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte steht, in 1 cm gegenseitigem Abstand die dynamische Kraft von 1 Dyn aufeinander ausüben.

Beide Angaben zur Festlegung der Stromeinheit sind nur dann verständlich, wenn das Produkt $l\cdot i$, das auf 1 cm entfällt, auf einen Punkt in der Mitte des Leiterteiles 1 zusammengedrängt gedacht wird.

Für das praktische elektrotechnische Maßsystem gilt:

$$1 \text{ Ampere} = 10^{-1} \text{ abs. Stromeinheiten.}$$

K. Elektrizitätsmenge.

Nach dem Gesetz, daß eine Elektrizitätsmenge gleich dem Produkt aus einer Stromstärke und einer Zeit ist:

$$\textit{Elektrizitätsmenge} = \textit{Stromstärke} \cdot \textit{Zeit}$$

$$Q = i\cdot t$$

folgt:

$$[Q] = [i\cdot t] = [l^{\frac{1}{2}}\cdot m^{\frac{1}{2}}\cdot t^0]$$

* Vgl. § 69, A.

und:

$$1 \text{ Elektrizitätsmengeneinheit} = 1\left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{ gr}^{\frac{1}{2}}\right];$$

oder in Worten:

Man erhält die absolute Einheit der Elektrizitätsmenge, wenn die absolute Stromeinheit 1 Sekunde lang fließt.

Für das praktische elektrotechnische Maßsystem gilt:

Die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge tritt auf, wenn 1 Ampere 1 Sekunde lang fließt, und heißt 1 Coulomb (= 1 Amperesekunde):

$$1 \text{ Coulomb} = 10^{-1} \text{ abs. Elektrizitätsmengeneinheiten.}$$

L. Spannung.

Nach dem Gesetz:

$$\textit{Leistung} = \textit{Spannung} \cdot \textit{Stromstärke}$$

$$L = E \cdot i$$

gilt:

$$[E] = [L : i]$$

oder mit Hilfe der Absätze F und J dieses Paragraphen:

$$[E] = \left[l^{\frac{3}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-2}\right];$$

daraus folgt die absolute Spannungseinheit:

$$1 \text{ abs. Spannungseinheit} = 1\left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sek.}^{-2}\right];$$

oder in Worten:

Die absolute Spannungseinheit ist diejenige Spannung, die mit der absoluten Stromeinheit multipliziert 1 Erg in der Sekunde ergibt.

Für das praktische elektrotechnische Maßsystem gilt:

$$1 \text{ Volt} = 10^{8} \text{ abs. Spannungseinheiten.}$$

Das ergibt sich aus den bereits festgelegten Maßen Watt und Ampere:

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Amp.} = 10^{8} \cdot 10^{-1} \text{ Erg/Sek.} = 10^{7} \text{ Erg/Sek.}$$

M. Widerstand.

Nach dem Ohmschen Gesetz:

$$\textit{Widerstand} = \textit{Spannung} : \textit{Stromstärke}$$

$$W = E : i$$

gilt:

$$[W] = [E : i]$$

und mit Hilfe der Absätze J und L dieses Paragraphen:

$$[W] = [l^{1} \cdot m^{0} \cdot t^{-1}];$$

daraus folgt:

$$1 \text{ abs. Widerstandseinheit} = 1\,[\text{cm} \cdot \text{Sek.}^{-1}].$$

Die absolute Widerstandseinheit erhält man als den Quotienten der absoluten Spannungs- und der absoluten Stromeinheit.

Für das praktische elektrotechnische Maßsystem folgt aus den bereits festgelegten Maßen des Volt und Ampere:

1 Ohm = 1 Volt : 1 Amp. = $10^8 : 10^{-1} = 10^9$ abs. Widerstandseinheiten.

N. Kapazität.

Nach dem Gesetz (vgl. § 10), daß ein bestimmter Kondensator eine zur (zwischen seinen Belägen auftretende) Spannung proportionale Elektrizitätsmenge aufnimmt:

$$\textit{Elektrizitätsmenge} = \textit{Kapazität} \cdot \textit{Spannung}$$

$$Q = C \cdot E$$

folgt für die Kapazität:

$$[C] = [Q : E]$$

oder mit Hilfe der Absätze K und L dieses Paragraphen:

$$[C] = [l^{-1} \cdot m^0 \cdot t^2];$$

für das absolute System gilt:

$$1 \text{ abs. Kapazitätseinheit} = 1\,[\text{cm}^{-1} \cdot \text{Sek.}^2].$$

Die absolute Einheit der Kapazität liegt vor, wenn bei einer absoluten Spannungseinheit (zwischen den Belägen) von dem Kondensator die absolute Elektrizitätsmengeneinheit aufgenommen wird.

Für das praktische elektrotechnische Maßsystem gilt:

Die Kapazität 1 besitzt derjenige Kondensator, der bei 1 Volt (zwischen den Belägen) die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb aufnimmt. Diese praktische Einheit heißt das Farad.

Daraus folgt:

$$1 \text{ Farad} = 10^{-1} : 10^8 = 10^{-9} \text{ abs. Kapazitätseinheiten.}$$

Für weitere magnetische Größen folgt die Entwicklung der Einheiten im nächsten Paragraphen.

Das hier entwickelte System heißt kurz das elektromagnetische, genauer das magnetostatische-elektromagnetische System, da der Weg in der Entwicklung der abgeleiteten Einheiten über das (magnetostatische) Coulombsche Gesetz der Magnetpole und über das Biot-Savartsche Gesetz führt, das die Verbindung zwischen magnetischen und elektrischen Größen liefert.

Geht man über das Coulombsche Gesetz der Elektrizitätsmengen aus dem Gebiet der mechanischen Größen in das der elektrischen, so entsteht das in die Praxis nicht eingeführte elektrostatische Maßsystem.

Die Dimensionen der abgeleiteten Einheiten können in verschiedenen Maßsystemen verschieden sein. Es spielt dabei die Lichtgeschwindigkeit $v = 3 \cdot 10^{10}$ cm/Sek. eine Rolle.

Es ist grundsätzlich falsch, in den Dimensionsformeln einen tieferen Sinn zu suchen und von ihnen einen Aufschluß über die physikalische Natur der Größen zu erwarten.

Dimensionsformeln dienen erstens zur Kontrolle von Gleichungen, zweitens geben Dimensionsformeln an, wie sich eine abgeleitete Einheit bei der Änderung der Grundeinheiten ändert.*

§ 69. Rechnungen mit magnetischen Größen.

A. Die Feldstärke in der Nähe eines langen geraden Drahtes.

Auf Grund des Biot-Savartschen Gesetzes (vgl. § 68, J) ist die von einem Leiterelement $a\,b$ (Fig. 205) herrührende Feldstärke in einem Punkte P:

$$\mathfrak{H}' = \frac{l' \cdot i \cdot \sin\alpha}{r^2}, \text{ Wiss. 1)}$$

wobei unter Anwendung absoluter Einheiten bedeutet:

l' = Länge des Leiterelementes $a\,b$,
i = Stromstärke,
α = Neigungswinkel des Stromleiterelementes zu P hin,
r = Abstand des Punktes P vom Leiterelement (Mitte).

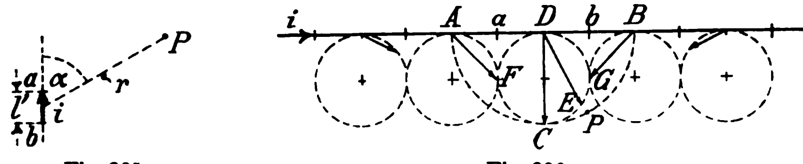


Fig. 205. Fig. 206.

H' ist bei der hier angegebenen Stromrichtung in die Bildebene hinein gerichtet.

Fig. 206 zeigt einen geraden Leiter eingeteilt in eine Anzahl Elemente, von denen das mittlere $a\,b$ heiße. Die Elemente sollen entsprechend dem absoluten Maßsystem ideell je 1 cm lang sein. Ebenfalls betrage die auf der Mitte von $a\,b$ errichtete Normale $D\,C = 1$ cm, und mit diesem $D\,C = c = 1$ cm sei der Halbkreis $A\,C\,B$ geschlagen, auf dem auch P liegen möge. Die von einem Leiterelement (z. B. $a\,b$) ausgehenden Kraftinien sind zu denken als zur Stromachse konzentrische Kreise; dabei nimmt aber, falls nur 1 Element vorhanden ist, die Feldstärke zur Stromachse hin immer mehr ab. Führt $a\,b$ die absolute Stromstärke $i = 1$, so ist in C, von $a\,b$ allein herrührend, die Feldstärke

$$\mathfrak{H}' = 1,$$

da sämtliche Größen auf der rechten Seite des Ausdruckes für das Biot-Savartsche Gesetz = 1 sind.

Wird aber auf dem Radius $c = 1$ (von D aus) α von 90^0 verschieden, z. B. für Punkt P in Fig. 206, so wird ebenfalls für $i_{\text{abs.}} = 1$:

$$\mathfrak{H}_P' = l' \sin\alpha_P,$$

* Aufschlüsse über das wissenschaftlich vollkommene, für elektrische Größen vierdimensionale System finden sich in der Elektrot. Zeitschr. 1904, S. 432 ff. (F. Emde).

oder, was dasselbe heißt: die auf dem Kreisbogen $c = 1$ (ACB) von ab vermöge des Stromes $i_{abs.} = 1$ herrührenden Feldstärken sind ausgedrückt durch die von D aus zu den betreffenden Punkten hin gerichteten Strahlen, gemessen bis zum Umfang des Kreises* mit dem Durchmesser DC (für P durch die Strecke DE).

Wir kehren nun zum Punkte C zurück und verwenden obigen Gedanken für C von den Nachbarelementen aus, in deren Mitten A und B liegt; die Nachbarelemente haben am Radius 1 auf C hin von ihren Mitten aus gerechnet die Feldstärken AF und BG, beide je $1:\sqrt{2}$; die Entfernungen AC und BC (je r_1) betragen aber je $\sqrt{2}$, so daß ihre Quadrate je 2 werden. Es kommt also zu dem Punkte C von den beiden ersten Nachbarelementen die Feldstärke hinzu:

$$\mathfrak{H}_1' = 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{2}{\sqrt{2^3}}; \ (\sim 0{,}707).$$

Wird dieses Verfahren der Reihe nach auch für weitere Nachbarelemente angewendet, so ergibt sich der Anteil dieser Elemente an der Feldstärke im Punkte C zu einer Reihe, deren Summe die wirklich im Punkte C auftretende Feldstärke darstellt. Die Reihe lautet unter Wiederholung der bisherigen Glieder:

$$\begin{aligned} \mathfrak{H}_C &= \mathfrak{H}' + \mathfrak{H}_1' + \mathfrak{H}_2' + \mathfrak{H}_3' + \dots \mathfrak{H}_n' \\ &= 1 + \frac{2}{2^{\frac{3}{2}}} + \frac{2}{5^{\frac{3}{2}}} + \frac{2}{10^{\frac{3}{2}}} + \dots \frac{2}{(n^2+1)^{\frac{3}{2}}} \\ &= 1 + 0{,}707 + 0{,}179 + 0{,}063 + \dots \end{aligned}$$

Diese Summe nähert sich für immer größer werdendes n dem Werte

$$\mathfrak{H}_c = 2\,.$$

Gehen wir nun ab von der Voraussetzung $i_{abs.} = 1$, sondern nimmt $i_{abs.}$ einen beliebigen größeren oder kleineren Wert an, so wird entsprechend dem Biot-Savartschen Gesetz der Anteil jedes Elementes proportional zum Strome vergrößert oder verkleinert, folglich wird auch die Summe der Wirkungen aller Elemente dem Strome proportional, und es erklärt sich hieraus, daß die Feldstärke in $c = 1$ cm Normalabstand von einem langen geraden Draht den Wert

$$\mathfrak{H}_{(1\,\mathrm{cm})} = 2 \cdot i_{abs.}$$

annimmt.

Verlassen wir schließlich auch die Voraussetzung, der betrachtete Punkt liege im Normalabstande $c = 1$ cm, und nehmen wir für c beliebige Werte an, so gilt

$$\mathfrak{H}_{(c\,\mathrm{cm})} = \frac{2 \cdot i_{abs.}}{c_{cm}},$$

* Da die Sinuslinie sich in Polarkoordinaten als Kreis darstellt.

wobei die Voraussetzung, daß der gerade Draht lang ist gegen c, erfüllt bleiben muß. Die Richtigkeit dieses Ausdruckes wird nachgewiesen durch Anwendung anderer Maßstäbe an Fig. 206. Bedeutet z. B. jede dort eingezeichnete Länge eines Leiterelementes c cm, so verändert sich sein Einfluß durch die Längenänderung um den c-fachen Wert. Da aber C nun auch c cm Abstand vom Draht hat, kommt außerdem der Faktor $1 : c^2$ hinzu, so daß die Wirkung jedes einzelnen Elementes und somit auch der ganzen Summe der Elemente mit $1 : c$ zu multiplizieren ist.

B. Die Feldstärke im Inneren von Spulen.

1. Aus dem Biot-Savartschen Gesetz folgt die Feldstärke für den Mittelpunkt einer kreisförmigen Stromschleife vom Radius r cm und von der Stromstärke $i_{abs.}$:

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi\, r_{cm} \cdot i_{abs.}}{r_{cm}^2} = \frac{2\pi\, i_{abs.}}{r_{cm}}.$$

2. Ist für eine aus z kreisförmigen Stromschleifen zusammengesetzte Spule der Wicklungsquerschnitt ebenfalls kreisförmig und in seinem Durchmesser gering gegen den Durchmesser der Windungen, so beträgt die Feldstärke in dem Mittelpunkte dieses Reifens vom Halbmesser r cm, bei dem jede Windung den Strom $i_{abs.}$ führt:

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi\, i_{abs.} \cdot z}{r}.$$

3. Für einen Punkt auf der Achse des unter 2. angegebenen Reifens gilt:

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi\, i_{abs.} \cdot z}{r} \cdot \frac{r^3}{R^3},$$

wobei R in cm den Abstand des betreffenden Punktes von dem Umfang des Reifens bedeutet.

4. Für eine gleichmäßig bewickelte, aus z Windungen bestehende zylindrische Spule (Solenoid) der axialen Länge l cm und vom mittleren Windungsradius r cm gilt für einen Punkt der Achse:

$$\mathfrak{H} = \frac{2\pi\, i_{abs.} \cdot z}{l} (\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1),$$

wobei (vgl. Fig. 207) φ_2 und φ_1 die Winkel bedeuten, unter denen von dem betreffenden Punkte aus die Endhalbmesser erscheinen.

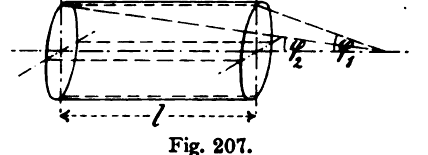


Fig. 207.

5. Ist für die unter 4. angegebene Spule das Verhältnis $l : r$ groß, so kann für den Mittelpunkt gesetzt werden:

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi\, i_{abs.} \cdot z}{l},$$

da $(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1)$ angenähert $= 2$ gesetzt werden kann.

Die Feldstärke ist für einen großen Raum des Spuleninneren nahezu konstant. Ist z. B. $l:r = 20$, so ändert sich $\mathfrak{H}$ auf $^2/_3$ der Länge nur um $0{,}1\,\%$, während hingegen nach den Enden hin $\mathfrak{H}$ schnell abnimmt. Da der eine $\cos\varphi$ am Ende der Spule $= 0$, ist tritt hier bereits die Hälfte des Wertes gegen das Spuleninnere auf.

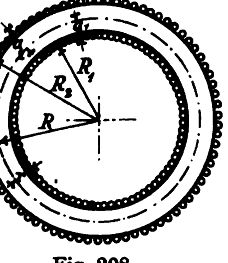


Fig. 208.

Für eine (vgl. Fig. 208) kreisringförmige, aus z Windungen bestehende, überall gleichmäßig bewickelte Spule (Toroid), deren mittlerer* Radius R groß ist gegen den mittleren Windungsradius r, gilt auf dem zu R gehörigen Umfang dieselbe Gleichung wie unter 5, wobei nur $l = 2R\pi$ zu setzen ist; daraus wird dann:

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi\, i_{\text{abs.}} \cdot z}{l} = \frac{2 \cdot i_{\text{abs.}} \cdot z}{R}.$$

Sowohl für Fall 5 als auch für Fall 6 kann die Windungszahl auf 1 cm Spulenlänge eingesetzt werden. Wird diese Zahl mit z' bezeichnet, so gilt für beide Fälle:

$$\mathfrak{H} = 4\pi i_{\text{abs.}} \cdot z';$$

wird die Stromstärke i in Ampere eingesetzt, so erhält man die Feldstärke nach dem Ausdruck:

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi}{10} \cdot i_{\text{Amp.}} \cdot z' \sim 1{,}257 \cdot i_{\text{Amp.}} \cdot z' \quad \text{Kraftlinien/qcm},$$

Der Wert $(i_{\text{Amp.}} \cdot z)$ heißt die Amperewindungszahl einer Spule (als Formelgröße $\mathfrak{Z}$), der Wert $(i_{\text{Amp.}} \cdot z')$ die Amperewindungszahl auf 1 cm Kraftlinienweg; wird letztere Größe mit $\mathfrak{Z}$ bezeichnet, so gilt für obige Gleichung:

$$\mathfrak{H} \sim 1{,}257 \cdot \mathfrak{Z}'.$$

Sämtliche unter B angegebene Gleichungen beziehen sich auf den Fall, daß kein Eisen in der Nähe der Spulen vorhanden ist.

C. Die Arbeit bei einmaligem Umfahren eines Stromlaufes mit dem Einheitspol.

Die in den Paragraphen 65 und 66 bereits angedeutete Vorstellung des Magnetismus als Strömungserscheinung hat dazu geführt, auch durch die Wahl der Maße und ihre Bezeichnungsweise die Anlehnung an die Lehre vom elektrischen Strome so weit durchzuführen, als das möglich ist. Zur Einleitung dazu diene folgende Betrachtung:

Bewegt sich ein Magnetpol in Richtung einer Kraftlinie, so tritt dabei Arbeit auf. Erfolgt die Bewegung im Sinne der treibenden

* Schärfer genommen gilt R für die Stelle, wo $a_1 : a_2$ sich verhält wie $R_1 : R_2$.

Kraft, so wird Arbeit geleistet; die Bewegung gegen die treibende Kraft hat zur Folge, daß dabei Arbeit überwunden werden muß. Das Vorzeichen der Arbeit soll nach dieser Bemerkung weiterhin außer acht gelassen werden. Weicht die Bahn des Magnetpoles von der Richtung der Kraftlinien ab, so kann sein Weg für jedes Wegelement in Komponenten zerlegt werden, von denen die eine Komponente in Richtung des Feldes mit Arbeitsleistung verbunden ist, während die zweite, dazu normalstehende Komponente, quer zum Felde, die Arbeit Null aufweist.

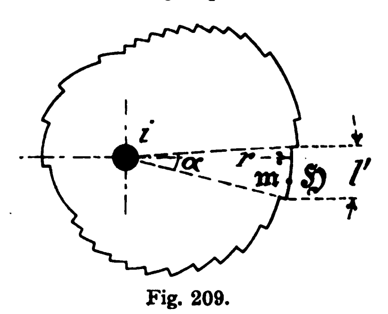


Fig. 209.

Wird ein Magnetpol $\mathfrak{m}$ entlang einer in sich geschlossenen Bahn einmal um einen elektrischen Strom i herumgeführt (Fig. 209), so ist die dabei auftretende Arbeit für jede beliebige Bahn stets dieselbe, nämlich gleich dem Wert, dem die Summe

$$A = \Sigma\, \mathfrak{m} \cdot \mathfrak{H} \cdot l'$$

für immer kleiner werdende Elemente l' zustrebt.

Setzen wir $\mathfrak{m}$ der absoluten Einheit gleich, so wird daraus:

$$A = \Sigma\, \mathfrak{H} \cdot l';$$

drücken wir in dieser Gleichung nun $\mathfrak{H}$ durch i in absoluten Einheiten aus, wobei zunächst für einen gegen r langen, geraden Stromleiter

$$\mathfrak{H} = \frac{2\, i_{\text{abs.}}}{r_{\text{cm}}}$$

eingesetzt sei, so wird:

$$A_{\text{abs.}} = \Sigma\, \frac{2\, i_{\text{abs.}}}{r_{\text{cm}}} \cdot l'_{\text{cm}}.$$

Berücksichtigt man ferner, daß jedes Wegelement $l' = \alpha \cdot r$ ist, wobei α den Zentriwinkel zu l' bedeutet, so wird:

$$A_{\text{abs.}} = \Sigma\, 2 \cdot i_{\text{abs.}} \cdot \alpha.$$

Für einmalige Umfahrung ist $\alpha = 2\pi$ und:

$$A_{\text{abs.}} = 4\pi\, i_{\text{abs.}}.$$


Fig. 210.

Bewegt sich ein Einheitsspol in einer geschlossenen Bahn einmal um einen Strom $i_{\text{abs.}}$ herum, so beträgt die dabei auftretende Arbeit $4\pi\, i_{\text{abs.}}$ Erg.

Genaue Untersuchungen haben gezeigt, daß für eine Spule von z Windungen, deren jede den Strom $i_{\text{abs.}}$ führt, unabhängig von der Form der Spule bei einmaliger Umfahrung der z Windungen mit dem

Einheitspol (Fig. 210) der Ausdruck gilt:

$$A_{\text{abs.}} = 4\,\pi\, i_{\text{abs.}} \cdot z\,;$$

wird die Stromstärke i in Ampere ausgedrückt, so ist zu schreiben:

$$A_{\text{abs.}} = 0{,}4\,\pi\, i_{\text{Amp.}} \cdot z\,,$$

oder, falls $i_{\text{Amp.}} \cdot z$ durch $\mathfrak{Z}$ (die Amperewindungszahl einer Spule) ausgedrückt wird:

$$A_{\text{abs.}} = 0{,}4\,\pi \cdot \mathfrak{Z} \sim 1{,}257\ \mathfrak{Z}\,.$$

D. Die Magnetisierung von Eisen.

Der weiteren Entwicklung elektrischer Größen liegt folgende Betrachtung zugrunde:

Bringt man Eisen in ein magnetisches Feld, so ist im Eisen die Zahl der Einheitslinien größer, als in der umgebenden Luft. Zu den Linien der Luft, die auch in dem vom Eisen eingenommenen Raume vorhanden sind, addieren sich die vom Eisen herrührenden Linien. Die letzteren sind proportional zu dem magnetischen Moment der Volumeneinheit. Unter dem magnetischen Moment $\mathfrak{M}$ eines Stabes versteht man (vgl. Fig. 211) das Produkt aus der Polstärke $\mathfrak{m}_{\text{abs.}}$ und dem Abstand l_{cm} der beiden Magnetpole voneinander.

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{m} \cdot l\,.$$

Fig. 211.

Das magnetische Moment der Volumeneinheit ist daher in obigen Grundmaßen das in Dynzentimeter ausgedrückte Moment eines Stabes von 1 qcm Querschnitt und 1 cm Länge. Es heißt die Intensität der Magnetisierung und wird als Formelgröße ausgedrückt mit $\mathfrak{J}$. Um von Poleinheiten auf Einheitslinien überzugehen (vgl. § 68, H) sind die ersteren mit $4\,\pi$ zu multiplizieren. Die vom Eisen herrührenden Einheitslinien auf 1 qcm Querschnitt betragen demnach $4\,\pi\,\mathfrak{J}$; die Zahl der Einheitslinien/qcm des Eisens im magnetischen Felde wird somit:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\,\pi\,\mathfrak{J}\,.$$

Dieser Wert $\mathfrak{B}$ heißt die magnetische Dichte.

Nun ist $\mathfrak{J}$ keineswegs eine zu $\mathfrak{H}$ proportionale oder nur durch einen mathematischen Ausdruck faßbare Zahl, sondern es ist ein Wert, der für verschiedene Eisensorten, für verschiedene gerade vorhandene Werte $\mathfrak{H}$ verschieden ist, und zudem noch abhängig ist von dem magnetischen Zustand, in dem das Eisen sich vorher befunden hatte. Schließlich spielt noch die Geschwindigkeit und die Art des Überganges von dem einen zu dem anderen magnetischen Zustand und die Temperatur, sowie das „Altern" des Eisens eine Rolle.

Die hier angegebenen Abhängigkeiten können nur auf dem Versuchswege gefunden werden (magnetometrische Methode, Duboissche Wage, ballistische Methode). Um Beispiele zu geben, sei in Fig. 212

für ein Schmiedeisen (A) und für ein Gußeisen (B) die Abhängigkeit zwischen $\mathfrak{J}$ und $\mathfrak{H}$ zum Ausdruck gebracht.

Für polebildendes Eisen ist zu beachten, daß $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{J}$ für diejenige Stelle gelten, wo Kraftlinien am Eisen weder ein- noch austreten, also zum Beispiel für die Mitte des durch Fig. 177 angedeuteten

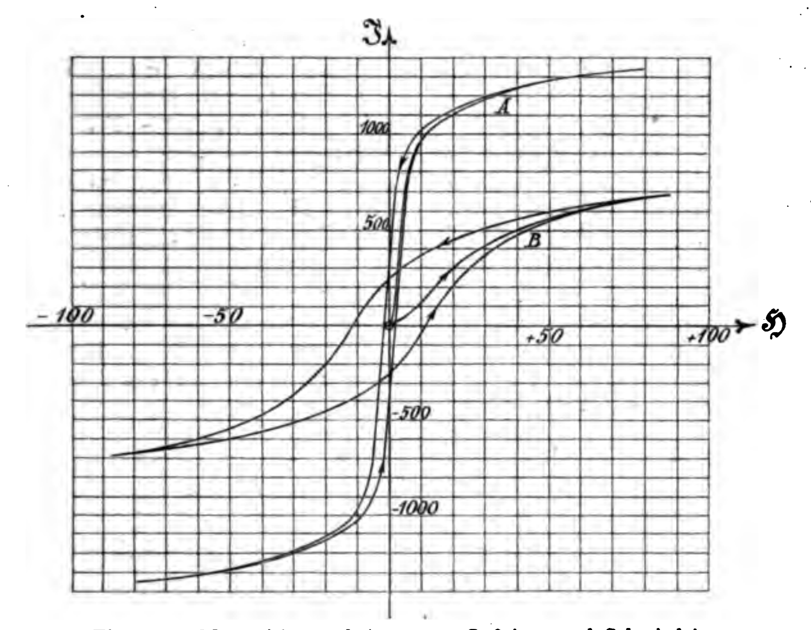


Fig. 212. Magnetisierungskurven von Gußeisen und Schmiedeisen.

Stabes, in deren nächster Umgebung das ursprünglich vorhandene stärkere Feld bis zum Werte $\mathfrak{H}$ geschwächt ist.

Für einen in sich geschlossenen magnetischen Kreis, z. B. bei einem Toroid (Fig. 208) mit geschlossenem Eisenkern, fällt die entmagnetisierende Wirkung fort, und daher kann hier in dem Ausdruck $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}$ ohne weiteres das durch den Strom erzeugte Feld $\mathfrak{H} = 0{,}4\,\pi\, i_{\text{Amp.}} \cdot z' \sim 1{,}257\, \mathfrak{Z}'$ zu Recht bestehen.

Die Kurven Fig. 212 deuten an, daß man sich bei der Magnetisierung des zunächst unmagnetischen Materiales mit steigendem $\mathfrak{H}$ auf einem zwischen zwei weiteren Kurvenzügen liegenden Ast bewegt. Hört die Steigerung auf, und beginnt nun die Verringerung der Feldstärke, so sind bei bestimmtem $\mathfrak{H}$ nun die Werte für $\mathfrak{J}$ größer als vorhin. Ist das äußere Feld $\mathfrak{H} = 0$, so besitzt das Eisen noch eine Magnetisierung, deren Intensität sich durch die auf der Ordinatenachse liegende Strecke darstellt. Dieser Wert $\mathfrak{J}$ ist derjenige, der für den remanenten Magnetismus in Betracht kommt, und der für Dauermagnete (aus hartem Stahl) möglichst hoch und unveränderlich

sein soll. Nur ein Feld in entgegengesetztem Sinn kann (von Ausglühen oder starken Erschütterungen abgesehen) die Magnetisierung $\mathfrak{J} = 0$ wiederherstellen, aber auch nur, solange der zugehörige negative Wert für $\mathfrak{H}$ vorhanden ist, denn ein Verschwinden dieses $\mathfrak{H}$ würde sofort wieder eine Steigerung des $\mathfrak{J}$ im alten Sinne hervorrufen. Wird $\mathfrak{H}$ im negativen Sinne weiter vermehrt, so nimmt $\mathfrak{J}$ negative, d. h. im Sinne des negativen Feldes auftretende Werte an. Ein Aufhören der Steigerung und daran anschließendes Verkleinern des Feldes wiederholt nach umgekehrter Richtung einen dem vorigen entsprechenden Kurvenzug, woran sich auch wieder eine Steigerung des Feldes im positiven Sinn anschließen möge. Wiederholt man mehreremal die hier angedeutete Magnetisierung zwischen zwei bestimmten Endwerten für $\mathfrak{H}$, so fallen die Kurvenzüge zu in sich geschlossenen Linien zusammen. Ein solcher Vorgang heißt dann ein Kreisprozeß oder Zyklus der Magnetisierung. Die ganze Erscheinung des Zurückbleibens (nicht etwa zeitlich aufzufassen!) der magnetischen Intensität hinter dem äußeren Felde heißt die Hysteresiserscheinung. Die entstehende Schleife heißt die Hysteresisschleife. Die durch die Hysteresisschleife eingeschlossene Fläche ist ihrer Dimension nach eine auf die Volumeneinheit bezogene Arbeit.

$$[\mathfrak{M}] = [\mathfrak{m} \cdot l] = [l^{\frac{5}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-1}]$$

$$[\mathfrak{J}] = [\mathfrak{m} \cdot l : l^3] = [l^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1}] = [\text{Feldstärke}]$$

$$[\mathfrak{J} \cdot \mathfrak{H}] = [l^{-\frac{1}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-1}]^2 = [l^{-1} \cdot m \cdot t^{-2}] = [\text{Arbeit/Vol.}].$$

Die durch die Hysteresisschleife eingeschlossene Fläche gibt die Anzahl Erg/ccm des betreffenden Eisens an, die bei einem Zyklus der Magnetisierung zu überwinden sind. Hier hilft wieder die Vorstellung der Molekularmagnete, indem die Hysteresisarbeit als die Reibungsarbeit der magnetischen Moleküle angesehen werden kann. Heißt die Hysteresisarbeit auf das ccm des Eisens A', so ist bei z ccm Eisen die Arbeit:

$$A = z \cdot A' \text{ Erg.}$$

Die Arbeit der Hysterese setzt sich in Wärme um, wodurch der Vergleich mit einer Reibungsarbeit unterstützt wird.

Bezeichnen wir das veränderliche Verhältnis

$$\mathfrak{J} : \mathfrak{H} = \varkappa ,$$

so wird:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H}(1 + 4\pi\varkappa);$$

$\varkappa$ heißt die magnetische Aufnahmefähigkeit (Suszeptibilität), der Ausdruck $(1 + 4\pi\varkappa)$ wird mit μ bezeichnet und heißt die magnetische Durchlässigkeit des Eisens (die Permeabilität). Es gilt daher:

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H};$$

μ ist eine unbenannte Zahl, stets größer als 1, die nur angibt, in

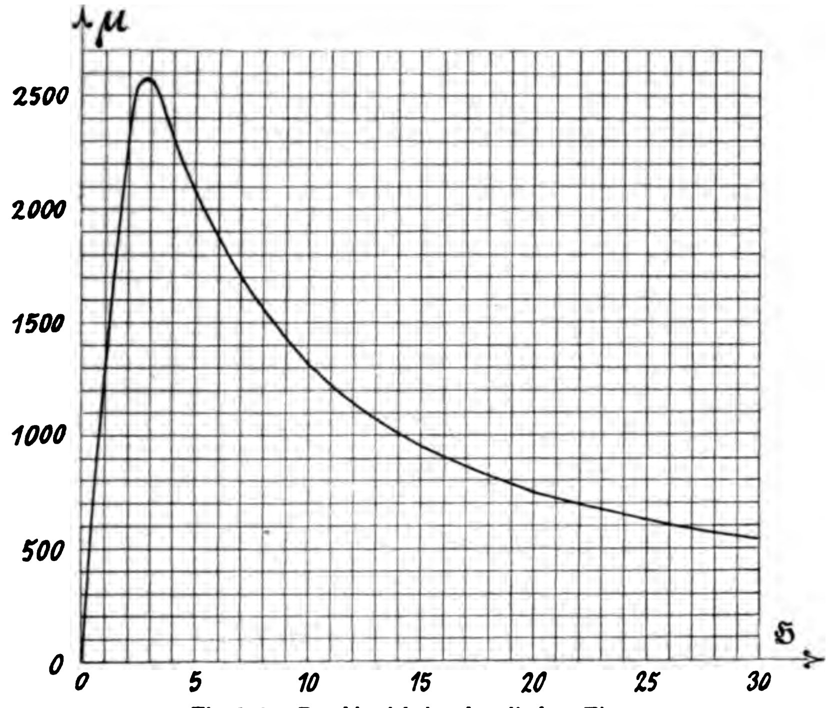


Fig. 213. Durchlässigkeit schwedischen Eisens.

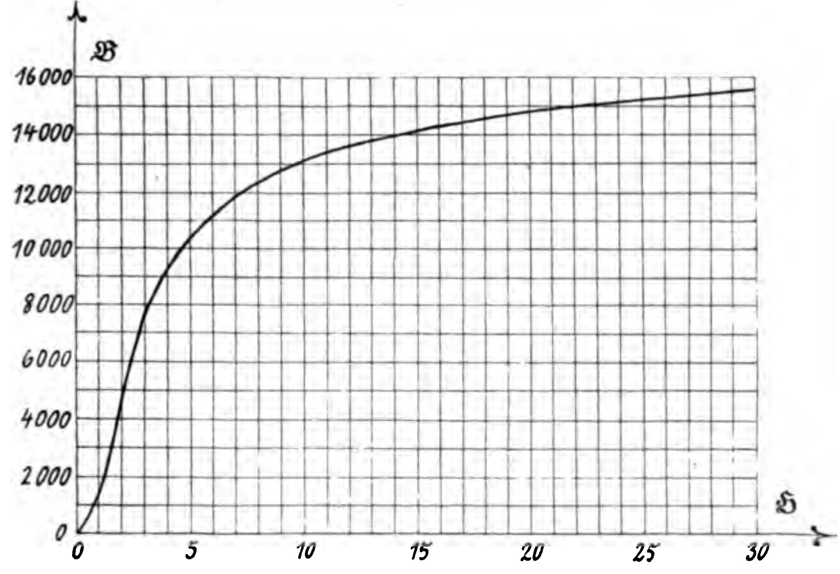


Fig. 214. Magnetische Dichte schwedischen Eisens.

welchem Maße die magnetische Dichte im Eisen größer ist als die Feldstärke der umgebenden Luft.

Die magnetische Durchlässigkeit kann für einige Materialien recht hohe Werte annehmen, so z. B. steigt sie für das den Kurven Figg. 213 und 214 zugrunde liegende schwedische Eisen auf 2570. Der Wert μ ist für alle Eisensorten bei geringsten Feldstärken klein, wächst dann rasch an, erhält seinen Höchstwert, nimmt mit größer werdenden Feldstärken ab und strebt weiterhin asymptotisch dem Wert 1 zu. Für Luft, Kupfer und elektritische Isoliermaterialien kann in jedem technisch vorkommenden Fall $\mu = 1$ gesetzt werden, so daß für diese Fälle $\mathfrak{B} = \mathfrak{H}$ wird. Nach Untersuchungen von Steinmetz ist die Hysteresisarbeit für die Volumeneinheit empirisch der 1,6-ten Potenz der größten Dichte $\mathfrak{B}_{max.}$ proportional, bis zu der das Eisen nach der positiven und nach der negativen Seite magnetisiert wird. Es beträgt für mittleres Dynamoblech (Ankereisen) die Arbeit auf den Zyklus:

$$A'_{\mathrm{Erg/ccm}} = \frac{1}{6} \cdot \mathfrak{B}^{1,6}_{max.} \cdot 10^{-2}.$$

Der hier für eine mittlere Eisensorte angegebene Wert $\frac{1}{6} \cdot 10^{-2}$ heißt der Steinmetzsche Faktor; er wird für beliebige Eisensorten mit η bezeichnet und schwankt zwischen 0,0024 (schlechtestes für elektrotechnische Zwecke annehmbares Eisen) und 0,001 und weniger.

Soll die Arbeit in Wattsekunden auf das ccm ausgedrückt werden, so ist 10^{-9}, oder in Wattsekunden auf das cdm 10^{-6} an Stelle von 10^{-2} zu setzen.

Unter Vernachlässigung von $\mathfrak{H}$ im Ausdruck $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}$ wird

$$\mathfrak{B} \sim 4\pi\mathfrak{J};$$

mit dem daraus folgenden $\mathfrak{J}$ kann obige Arbeitsformel auch geschrieben werden:

$$A'_{\mathrm{Erg/ccm}} \sim \frac{57,4}{6} \cdot \mathfrak{J}^{1,6}_{max} \cdot 10^{-2} \quad \text{oder} \quad 0,1\,\mathfrak{J}^{1,6}_{max.} \cdot$$

Durchsetzen $\mathfrak{N}$ Einheitslinien gleichmäßig den Querschnitt eines Materiales von q qcm, so ist in diesem Material (vgl. § 68, I) die magnetische Dichte

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{N} : q;$$

mit der Gleichung $\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H}$ wird hieraus:

$$\mathfrak{N} : q = \mu \cdot \mathfrak{H}$$

oder

$$\frac{\mathfrak{N}}{q \cdot \mu} = \mathfrak{H};$$

ist der Weg in Richtung der Einheitslinien für das betrachtete Stück, zu dem die Werte q und μ gehören, l cm lang, so entsteht durch

Multiplikation dieser Gleichung mit l:

$$\mathfrak{N} \cdot \frac{l}{q \cdot \mu} = \mathfrak{H} \cdot l.$$

Durchläuft dasselbe Bündel der $\mathfrak{N}$ Einheitslinien der Reihe nach verschiedene Stücke, so erfordert jedes von ihnen einen Wert $\mathfrak{H} \cdot l$, und für den ganzen Weg muß die Summe aller dieser Werte $\mathfrak{H} \cdot l$ aufgebracht werden. Sind zusammengehörige Größen durch gleichen Index ausgedrückt, so gilt demnach:

$$\mathfrak{N}\left(\frac{l_1}{q_1 \cdot \mu_1} + \frac{l_2}{q_2 \cdot \mu_2} + \ldots\right) = \mathfrak{H}_1 l_1 + \mathfrak{H}_2 l_2 + \ldots;$$

der hier entwickelten Gleichung unterliegt jeder magnetische Kreis, unbekümmert um die Art der Entstehung des Magnetismus. Die sich auf der rechten Seite bildende Summe bezogen auf den ganzen Kreis heißt die magnetomotorische Kraft (MMK) des Kreises; die linke Seite ist ein Produkt aus der strömenden Menge und aus einer Summe von Werten, die Länge, Querschnitt und Materialeigenschaft des durchströmten Teiles enthalten.

Die ganze Berechnungsweise ist derjenigen des elektrischen Stromkreises nachgebildet, wobei $\mathfrak{N}$ der Stromstärke, der Klammerwert dem Widerstande und die rechte Seite der EMK entspricht. Die Werte μ sind analog dem spezifischen Leitvermögen λ (vgl. § 35). Der Wert $\mathfrak{N}$ ist der bereits in § 68, I definierte Kraftfluß; der Klammerwert heißt der magnetische Widerstand des Kreises, der als Formelgröße $\mathfrak{W}$ geschrieben sein möge, während die MMK mit $\mathfrak{K}$ bezeichnet sei. Der obige Ausdruck lautet somit:

$$\mathfrak{N} \cdot \mathfrak{W} = \mathfrak{K}^{*}.$$

Wird die Magnetisierung durch einen elektrischen Strom vorgenommen, so umschließen sich Kraftfluß und Stromwindungen gegenseitig etwa wie zwei Kettenglieder (vgl. Fig. 210). Entlang der Bahn jeder (einmal in beliebiger Form um die Stromwindungen geführten)

---

* Aus der Definition von $\mathfrak{K}$ folgt:

$$[\mathfrak{K}] = [\mathfrak{H} \cdot l]$$

oder nach § 68, H:

$$[\mathfrak{K}] = [l^{\frac{1}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-1}];$$

für absolute Einheiten gilt daher:

$$1 \text{ MMK-Einheit} = 1\,[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{gr}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sek.}^{-1}].$$

Aus $\mathfrak{N} \cdot \mathfrak{W} = \mathfrak{K}$ ergibt sich:

$$[\mathfrak{W}] = [\mathfrak{K} : \mathfrak{N}]$$

oder nach § 68, I:

$$[\mathfrak{W}] = [l^{-1}];$$

demnach gilt:

$$1 \text{ magnetische Widerstandseinheit} = 1\,[\text{cm}^{-1}].$$

Einheitslinie tritt daher als $\Sigma \mathfrak{H} l$ derselbe Wert auf, der am Ende von Absatz C dieses Paragraphen dort als Arbeit des Einheitspoles bei einmaligem Umfahren der den Kraftfluß erzeugenden Stromwindungen zu

$$\Sigma \mathfrak{H} l = 0{,}4\,\pi\, i_{\text{Amp.}} \cdot z \sim 1{,}257\, \mathfrak{Z}$$

gerechnet wurde. Dieser Wert stellt unmittelbar den nach obigen Entwicklungen geforderten Wert für die rechte Seite der Gleichungen, also für $\mathfrak{K}$ dar. Es gilt daher, wenn ein Strom von i Ampere mit z Windungen den Kraftfluß $\mathfrak{N}$ umgibt:

$$\mathfrak{N} \cdot \mathfrak{W} = 0{,}4\pi i z = 0{,}4\pi \mathfrak{Z}.$$

Diese Betrachtung lehrt zunächst: In dem durch einen elektrischen Strom erregten magnetischen Kreise spielt die Amperewindungszahl $\mathfrak{Z}$ der magnetisierenden Spule eine Rolle, wie die EMK im elektrischen Stromkreise. Die Amperewindungszahl ist nur nicht ohne weiteres die MMK, sie muß erst mit $0{,}4\,\pi$ ($\sim$ 1,257) multipliziert werden.

Die Stromspule ist die Quelle des magnetischen Kraftflusses; die von ihr hergestellten Amperewindungen werden entlang des magnetischen Kreises zur Überwindung seiner Widerstände gebraucht.*

Der magnetische Widerstand im Eisen usw. ist für die technisch vorkommenden Fälle bedeutend geringer als in Luft; daher bevorzugt die magnetische Strömungserscheinung das Eisen, den besseren Leiter, der mit der Umgebung des Eisens, dem schlechteren Leiter, parallelgeschaltet ist.

Werden die von den einzelnen Teilen des magnetischen Kreises beanspruchten Amperewindungszahlen getrennt, so kann geschrieben werden:

$$\frac{\mathfrak{N}}{0{,}4\pi}\left(\frac{l_1}{q_1 \mu_1} + \frac{l_2}{q_2 \mu_2} + \ldots\right) = (i z)_1 + (i z)_2 + \ldots,$$
$$= \mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{Z}_2 + \ldots,$$

wobei die Werte $\mathfrak{Z}$ proportional den in der Klammer stehenden Summanden auftreten.

Obige Gleichungen drücken weiter nichts aus, als den Gedanken:

Jeder von den $\mathfrak{N}$ Einheitslinien durchsetzte Teil beansprucht eine bestimmte aus Länge, Querschnitt und Material berechenbare Amperewindungszahl. Die Summe dieser einzelnen Amperewindungszahlen, gerechnet für den ganzen Kreis, muß an beliebiger Stelle des Kreises durch die (sämtliche $\mathfrak{N}$ Einheitslinien umgebenden) Stromwindungen aufgebracht werden.

Die letzte Gleichung besagt, daß die von den einzelnen Teilen des magnetischen Kreises geforderten Amperewindungszahlen zunächst

* Die Analogie zwischen dem magnetischen und elektrischen Stromkreise ist nicht vollkommen: Gleichzeitiges Auftreten von MMK und Kraftfluß bedeutet keine Leistung. Es tritt nur Arbeit auf mit einer Änderung der Einheitslinienzahl eines Kreises. Das Vorhandensein eines Kraftflusses ist nicht verbunden mit einer Wärmeentwicklung in den magnetischen Widerständen. Daß μ sehr veränderlich ist, und daß Luft Kraftlinien leitet, ist kein grundsätzlicher Unterschied.

proportional zu ihrer Länge sind. Die Werte $\mathfrak{N}:q$ stellen die magnetischen Dichten $\mathfrak{B}$ dar, während die Faktoren $1:\mu$ angeben, in welchem Maße besser magnetisch leitende Materialien weniger Ampere-

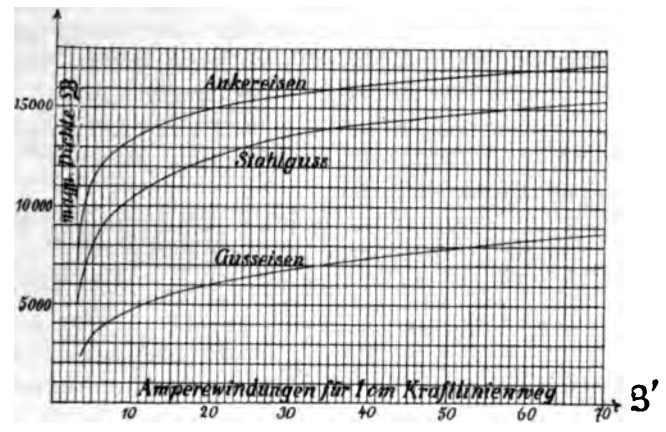


Fig. 215. Mittlere Kurven der magnetischen Dichte.

windungen brauchen als Luft (genauer der luftleere Raum). Hieraus erklärt sich das Verfahren für die praktische Berechnung magnetischer

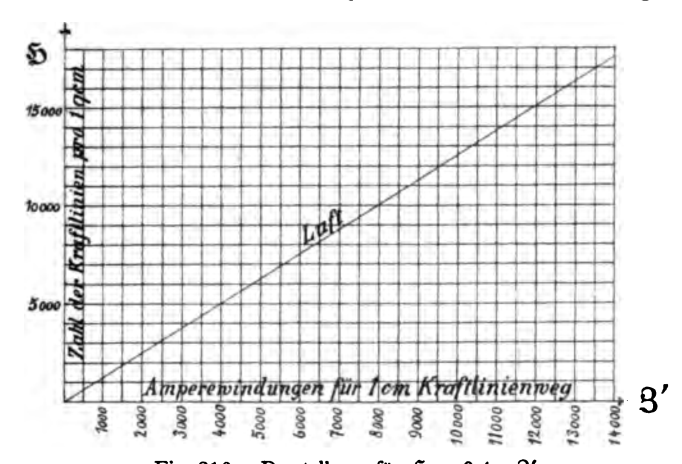


Fig. 216. Darstellung für $\mathfrak{H} = 0{,}4\,\pi\,\mathfrak{Z}'$.

Kreise, die auf Grund der Kurven Fig. 215 bzw. der geraden Linie Fig. 216 erfolgt.

Fig. 215 enthält für die drei technisch wichtigsten Eisensorten als Abszissen die für 1 cm der mittleren Einheitslinie des Kreises erforderliche Amperewindungszahl, wenn die als Ordinate aufgetragene

magnetische Dichte $\mathfrak{B}$ erreicht werden soll.* Durch Multiplikation dieser Amperewindungen für 1 cm mit der in cm ausgedrückten Länge des zugehörigen Teiles der mittleren Einheitslinie erhält man die für das betreffende Stück erforderliche Amperewindungszahl. Für Luft und andere technisch vorkommende, nicht aus Eisen bestehende Materialien enthält Fig. 216 nur die der Gleichung (vgl. Abs. B dieses Paragraphen)

$$\mathfrak{H} = 0{,}4\,\pi\,\mathfrak{Z}' \sim 1{,}257\,\mathfrak{Z}'$$

entsprechende gerade Linie, wobei $\mathfrak{Z}'$ die für 1 cm Kraftlinienweg zu dem betreffenden $\mathfrak{H}$ gehörige Amperewindungszahl bedeutet.

E. Die Zugkraft von Magneten.

Die Zugkraft in einer normal zu den Kraftlinien stehenden Ebene von q qcm, über die die Kraftlinien zu einem homogenen Feld $\mathfrak{H}$ verteilt sind, beträgt, wie sich rechnerisch ableiten läßt (Maxwell):

$$P_{\text{abs.}} = \frac{1}{8\pi} \cdot \mathfrak{H}^2 \cdot q \text{ Dyn};$$

wird die Kraft in kg ausgedrückt, so ergibt sich unter Voraussetzung einer Erdbeschleunigung von 981 cm/Sek.^{2}:

$$P = \frac{1}{8\pi \cdot 981\,000} \cdot \mathfrak{H}^2 q \sim 0{,}0000000406\,\mathfrak{H}^2 \cdot q \text{ kg}.$$

Mit Hilfe dieses Ausdruckes kann erläutert werden, wie die Entstehung der unter D dieses Paragraphen gegebenen Kurven durch Versuche gedacht werden kann, obgleich das Verfahren Ungenauigkeiten enthält.

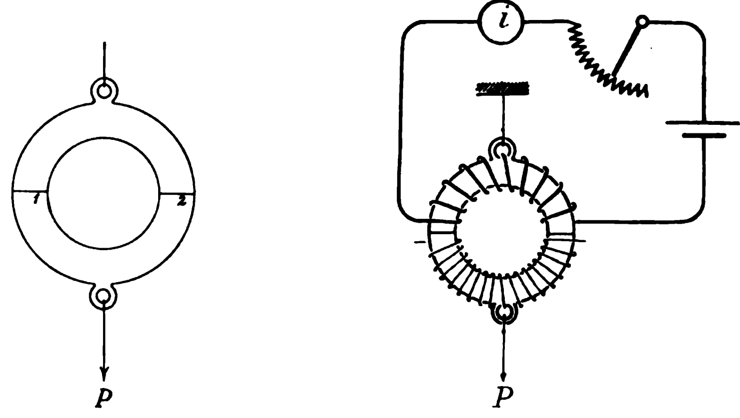


Fig. 217. Fig. 218. Versuchsschema.

Wird ein Eisenring etwa nach Fig. 217 bei 1 und 2 aufgeschnitten, so ist bei der Magnetisierung unter Voraussetzung unendlich geringen Luftraumes an der Trennstelle $\mathfrak{B} = \mathfrak{H}$ zu setzen. Wird nun

* Ohne Rücksicht auf Hysterese.

der Ring zuerst sehr stark magnetisiert, z. B. dadurch, daß der in der Versuchsanordnung Fig. 218 gezeichnete Kurbelwiderstand auf geringen Ohmzahlen steht, so kann eine beträchtliche Last P angehängt werden; nimmt nun der Strom, etwa durch allmähliche Vergrößerung der Ohmzahl des Kurbelrheostaten, langsam ab, so tritt schließlich der Augenblick ein, wo das angehängte Gewicht abreißt. Für diesen Fall kann unter Berücksichtigung von q (Summe der Querschnitte 1 und 2) $\mathfrak{B}$ aus P berechnet werden. Aus der beim Abreißen vorhandenen Stromstärke i und der vom Strom durchflossenen Windungszahl z erhält man unter Berücksichtigung der mittleren Länge der Einheitslinie die Zahl der Amperewindungen auf das cm. Durch diese Betrachtung ist also etwas über eine Möglichkeit der Ermittelung der unter D dieses Paragraphen gegebenen Kurven gesagt. Tatsächlich ist der Einfluß der Trennstelle so groß, daß Abreißversuche zu Messungen nicht heranzuziehen sind.

Aus dem quadratischen Auftreten von $\mathfrak{H}$ ist es verständlich, daß zur Herstellung möglichst großer Zugkraft ein Kraftfluß an den Trennstellen zusammengeschnürt werden muß, was durch geeignete Form der Pole erreicht werden kann.

Kommt es hingegen darauf an, einen Kraftfluß mit möglichst geringen Zugkräften durch eine Trennstelle zu leiten, so ist das Eisen vor der Trennstelle zu erweitern (Polschuhe).

F. Beispiele für die Berechnung magnetischer Kreise.

Die Rechnungen mit magnetischen Größen nach dem in den folgenden Beispielen angegebenen Verfahren führen nur zu angenäherten Ergebnissen. Genauere Rechnungen mit magnetischen Größen sind schwierig, denn die Eigenschaften der Materialien sind auf einfache Weise nicht scharf zu fassen. Auch die Ausbreitung der Kraftlinien an Trennstellen infolge ihrer gegenseitigen Abstoßung und die entmagnetisierende Wirkung in solchen nicht geschlossenen magnetischen Kreisen müßte streng genommen berücksichtigt werden. Praktisch kann man diese Erscheinungen vernachlässigen, wenn die Luftstrecken gegen die Eisenwege der Linien und gegen die Querabmessungen des Kraftflusses gering sind. Infolge des unscharfen Verfahrens sind auch gröbere Abrundungen als bei Rechnungen mit elektrischen Größen zulässig. In den meisten praktischen Fällen genügt der in folgenden Beispielen erzielte Annäherungsgrad.

1. Beispiel. Auf einem in sich geschlossenen Kreisring aus Gußeisen von dem mittleren Halbmesser $R = 5$ cm (vgl. Fig. 208) und $r = 1$ cm liegen $z = 100$ von $i = 10$ Ampere durchflossene Windungen. Wieviel Einheitslinien durchsetzen den Ring nach Angabe der Gußeisenkurve von Fig. 215?

Die Zahl der Amperewindungen beträgt:

$$\mathfrak{Z} = i \cdot z = 10 \cdot 100 = 1000 \text{ AW};$$

daraus folgt:

$$\mathfrak{Z}' = \frac{\mathfrak{Z}}{2R\pi} = \frac{1000}{2 \cdot 5\pi} = 31{,}8 \text{ AW/cm};$$

für dieses $\mathfrak{Z}'$ ergeben sich aus der Kurve Fig. 215:

$$\mathfrak{B} = 6900 \text{ Einheitslinien auf das qcm};$$

der gesamte Kraftfluß beträgt demnach:

$$\mathfrak{N} = \mathfrak{B} \cdot r^2\pi = 6900 \cdot \pi = 21\,700 \text{ Einheitslinien.}$$

2. Beispiel. In den Ring des vorigen Beispieles sei durch einen Sägeschnitt normal zum Umfang an Stelle des magnetischen Kreises ein überall gleichmäßiger Luftraum von $l_L = 0{,}2$ cm Länge eingeschaltet. Wieviel Amperewindungen sind aufzubringen, damit $\mathfrak{N} = 10\,000$ Kraftlinien in ihm auftreten?

Der Weg der Einheitslinien im Eisen beträgt:

$$l_E = 2R\pi - l_L = 31{,}4 - 0{,}2 = 31{,}2 \text{ cm};$$

die magnetische Dichte in Eisen ist:

$$\mathfrak{B} = \frac{\mathfrak{N}}{r^2\pi} = \frac{10\,000}{3{,}14} = 3180 \text{ Einheitslinien/qcm};$$

die Amperewindungszahl auf das cm Länge beläuft sich nach Angabe der Gußeisenkurve von Fig. 215 für dieses $\mathfrak{B}$ auf $\mathfrak{Z}'_E = 4{,}6$ und für den ganzen Eisenweg werden gebraucht:

$$\mathfrak{Z}_E = \mathfrak{Z}'_E \cdot l_E = 4{,}6 \cdot 31{,}2 = 144 \text{ AW}.$$

Die magnetische Feldstärke im Luftraum ist angenähert ebenfalls zu setzen:

$$\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{N}}{r^2\pi} = \frac{10\,000}{3{,}14} = 3180 \text{ Kraftlinien/qcm};$$

die Amperewindungszahl auf das cm Länge ist aus der Linie für Luft, Fig. 216, für dieses $\mathfrak{H}$ zu entnehmen oder nach der Formel $\mathfrak{Z}'_L = \mathfrak{H} : 1{,}257$ zu rechnen zu $\mathfrak{Z}'_L = 2530$ AW/cm; für den vorhandenen Luftweg werden gebraucht:

$$\mathfrak{Z}_L = \mathfrak{Z}'_L \cdot l_L = 2530 \cdot 0{,}2 = 506 \text{ AW};$$

in Summa sind aufzubringen:

$$\mathfrak{Z}_E + \mathfrak{Z}_L = 144 + 506 = 650 \text{ AW.*}$$

3. Beispiel. Ein Elektromagnet mit den Abmessungen (cm) der Fig. 219 sei in allen Teilen aus Schmiedeisen hergestellt, für das die unter Fig. 215 mit „Ankereisen" bezeichnete Kurve gelten soll. Der

* Dieses Beispiel zeigt für geringes $\mathfrak{B}$ selbst für Gußeisen das Überwiegen der Luftamperewindungen gegen die Eisenamperewindungen, was für Schmiedeisen (vgl. 3. Beispiel) noch mehr hervortritt.

Magnet ist mit einer Wicklung für $i = 50$ Ampere zu versehen, so daß er für die gezeichnete Stellung mit 0,8 cm Luftraum zwischen Polen und Anker eine Zugkraft $P = 2$ kg ausübt.

a) Wieviel Windungen sind aufzubringen?

b) Wieviel kg zieht der Magnet ebenfalls bei 50 Ampere, wenn sein Luftraum sich bei angezogenem Anker auf 0,05 cm vor jedem Pol verringert hat?

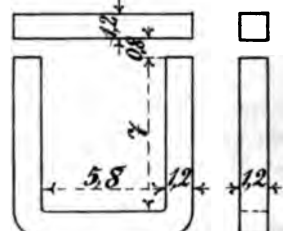


Fig. 219.

Zu a) Infolge des großen Luftraumes sei gerechnet, als ob die Kraftlinien sich vor jedem Pol gleichmäßig über $q'_L = 4$ qcm ausgebreitet hätten. Für die Zugkraft P kommt daher in Betracht ein Querschnitt

$$q_L = 2\, q'_L = 2 \cdot 4 = 8 \text{ qcm};$$

aus $P = 0{,}0000000406\, \mathfrak{H}^2 \cdot q_L$ folgt:

$$\mathfrak{H} = \sqrt[2]{\frac{P}{0{,}0000000406 \cdot q_L}} = \sqrt[2]{\frac{2}{0{,}0000000406 \cdot 8}}$$
$$= 2480 \text{ Kraftlinien/qcm};$$

zu diesem $\mathfrak{H}$ gehört ein $\mathfrak{Z}'_L = \frac{2480}{1{,}257} = 1975$ AW/cm und für den gesamten Luftraum von der Länge $l_L = 2 \cdot 0{,}8 = 1{,}6$ cm ein

$$\mathfrak{Z}_L = \mathfrak{Z}'_L \cdot l_L = 1975 \cdot 1{,}6 = 3160 \text{ AW}.$$

Der Querschnitt des Eisenweges beträgt

$$q_E = 1{,}2 \cdot 1{,}2 = 1{,}44 \text{ qcm}$$

und die magnetische Dichte

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} \cdot q'_L : q_E = 2480 \cdot 4 : 1{,}44 = 6900 \text{ Einheitslinien/qcm},$$

die nach Angabe der Ankereisenkurve in Fig. 215 etwa 3 Amperewindungen auf das cm erfordern, so daß für $\sim$ 30 cm Länge der mittleren Linie etwa $\mathfrak{Z}_E = 3 \cdot 30 = 90$ AW in Frage kommen.

In Summa sind daher aufzubringen:

$$\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}_L + \mathfrak{Z}_E = 3160 + 90 = 3250 \text{ AW},^*$$

die bei $i = 50$ Ampere

$$z = \frac{\mathfrak{Z}}{i} = \frac{3250}{50} = 65 \text{ Windungen}$$

oder $\sim$ 33 Windungen auf jedem Schenkel erfordern.

---

* Bei der Ungenauigkeit des Verfahrens brauchen bei so geringem $\mathfrak{B}$ die Eisenamperewindungen überhaupt nicht berücksichtigt zu werden.

Zu b) Für diese Rechnung ist ein Schätzungsverfahren anzuwenden. Schätzt man zunächst auf $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} = 15000$, so ergibt sich daraus

$$\mathfrak{Z}_E = 20 \cdot 30 = 600 \text{ AW}$$
$$\mathfrak{Z}_L = 11940 \cdot 0{,}1 = 1194 \text{ „}$$
$$\text{zusammen } 1794 \text{ „}$$

dieser Wert bleibt sehr hinter 3250 AW zurück, daher muß die Magnetisierung höher liegen. Nach einigem Proben findet man, daß für $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} = 17050$ gilt:

$$\mathfrak{Z}_E = 63{,}3 \cdot 30 = 1900 \text{ AW}$$
$$\mathfrak{Z}_L = 13570 \cdot 0{,}1 = 1357 \text{ „}$$
$$\text{zusammen } 3257 \text{ „ ,}$$

eine Annäherung, die als genügend zu betrachten ist. Mit der weiteren Abrundung $\mathfrak{H} \doteq 17000$ und unter der Voraussetzung, daß die Erweiterung des Kraftflusses zwischen Polen und Anker bei diesem kleinen Luftraum vernachlässigt werden kann, ergibt sich:

$$P = 0{,}0000000406 \cdot 17000^2 \cdot 2{,}88 = 33{,}8 \text{ kg.}$$

Die Zugkraft im Falle *b* ist also nahezu um den 17-fachen Wert gesteigert.*

4. Beispiel. Es soll ein Lastmagnet (vgl. § 22, 2) gemäß den in Fig. 220 gegebenen Verhältnissen zu folgenden Bedingungen berechnet werden: Die größte gerade noch zu tragende Last sei

$$P = 6000 \text{ kg;}$$

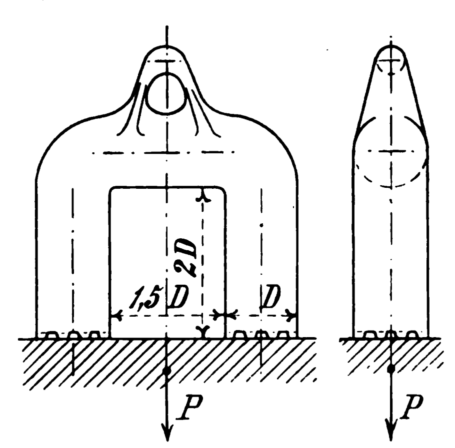


Fig. 220. Schema zum Lastmagneten.

die untere Polfläche sei durch kreuzweise eingehobelte Rinnen auf $^1/_4$ der zu D gehörigen Kreisfläche verkleinert. An der Trennstelle, da wo sich Eisen mit Eisen berührt, sei ($\mathfrak{B} =$) $\mathfrak{H} = 29000$ Kraftlinien/qcm eingesetzt. Zur Sicherheit werde aber gerechnet, als ob an der Trennstelle von Eisen zu Eisen eine Luftstrecke von $l'_L = 0{,}2$ cm pro Pol zu durchsetzen wäre. Für $\mathfrak{B} = 29000$ habe das Eisen eine Durchlässigkeit $\mu = 3{,}8$, im übrigen gelte die Ankereisenkurve von Fig. 215. Die Last beanspruche im ungünstigsten Falle den dreifachen Wert der

* Könnten die Eisenamperewindungen gänzlich vernachlässigt werden, so würde unter der Voraussetzung, daß die Luftwege klein zu ihren Querabmessungen sind, die Zugkraft eines bestimmten Magneten umgekehrt proportional zum Quadrat der Luftstrecke sein.

Amperewindungszahl des Magnetkernes. Der Magnet ist an $E = 220$ Volt anzuschließen.

Bei $\mathfrak{B} = 29000$ beträgt das äußere Feld

$$\mathfrak{H}' = \frac{\mathfrak{B}}{\mu} = \frac{29000}{3,8} = 7640 \text{ Kraftl./qcm.}$$

Dieses Feld $\mathfrak{H}'$ nimmt gegen $\mathfrak{H}$ die dreifache Polfläche (entsprechend der Zusammenziehung auf $^1/_4$) ein. Es kommen also auf das Kerneisen des Magneten

$$\mathfrak{B}_K = \frac{1}{4}(\mathfrak{B} + 3\,\mathfrak{H}') = \frac{1}{4}(29000 + 3 \cdot 7640) = 13000 \text{ Einheitsl./qcm.}$$

Die Kraft P berechnet sich demnach zu

$$P = 2 \cdot 0{,}0000000406 \cdot \left(D^2 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{4} \cdot \mathfrak{H}^2 + D^2 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{3}{4} \cdot \mathfrak{H}'^2\right)$$

$$= 2 \cdot 0{,}0000000406 \cdot D^2 \cdot \frac{\pi}{16}(29000^2 + 3 \cdot 7640^2) = 16{,}2\, D^2,$$

und daraus ergibt sich

$$D = \sqrt[2]{\frac{P}{16{,}2}} = \sqrt[2]{\frac{6000}{16{,}2}} = 19{,}2 \sim 20 \text{ cm.}$$

Zum Durchsetzen der an den Polflächen stehenbleibenden Zähne sind bei $\mathfrak{B} = 29000$ erforderlich

$$\mathfrak{Z}'_Z = \frac{\mathfrak{H}'}{0{,}4\,\pi} = \frac{7640}{1{,}257} = 6080 \text{ AW/cm.}$$

Obgleich die Zähne sich nach oben erweitern sollen, sei zur größeren Sicherheit gerechnet, als ob eine Zahnlänge von $l_Z = 0{,}5$ cm an jedem Pol $\mathfrak{B} = 29000$ führte, so daß für die Zähne beider Pole zusammen

$$\mathfrak{Z}_Z = \mathfrak{Z}'_Z \cdot l_Z = 6080 \cdot 1 = 6080 \text{ AW}$$

gebraucht werden.

Für die anzunehmende von $\mathfrak{H} = 29000$ Kraftl./qcm durchsetzte Luftstrecke sind erforderlich

$$\mathfrak{Z}'_L = \frac{\mathfrak{H}}{0{,}4\,\pi} = \frac{29000}{1{,}257} = 23100 \text{ AW/cm}$$

oder bei l_L in Summa $= 0{,}4$ cm wird

$$\mathfrak{Z}_L = \mathfrak{Z}'_L \cdot l_L = 23100 \cdot 0{,}4 = 9240 \text{ AW.}$$

Für den Kern mit $\mathfrak{B}_K = 13000$ Einheitsl./qcm kommt in Frage (aus Fig. 215):

$$\mathfrak{Z}'_K = 8{,}2 \text{ AW/cm}$$

und, da $l_K \sim 140$ cm zu durchsetzen sind:

$$\mathfrak{Z}_K = \mathfrak{Z}'_K \cdot l_K = 8{,}2 \cdot 140 = 1150 \text{ AW.}$$

Die Last beansprucht gemäß der in der Aufgabe gemachten Annahme:

$$\mathfrak{Z}_{Last} = 3\,\mathfrak{Z}_K = 3 \cdot 1150 = 3450 \text{ AW.}$$

In Summa sind aufzubringen:

$$\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}_Z + \mathfrak{Z}_L + \mathfrak{Z}_K + \mathfrak{Z}_{Last}$$
$$= 6080 + 9240 + 1150 + 3450 = 19920 \sim 20000 \text{ AW.}$$

Als Ergebnis einiger Schätzung wird gefunden: Für die Spulen werde ein Draht von

$d_{Cu} = 1,4$ mm Kupferdurchmesser,
$d_a = 2,0$ „ Außendurchmesser, und
$q = 1,54$ qmm verwendet.

Auf 360 mm Schenkellänge gehen $360 : 2 = 180$ Windungen in einer Schicht. Bei Anwendung von 2 Spulen (auf jedem Schenkel eine) zu je 40 Schichten sind im ganzen vorhanden $z = 80 \cdot 180 = 14400$ Windungen, sie erfordern einen Strom $i = \mathfrak{Z} : z = 20000 : 14000 = 1,39$ Amp.

Bei 40 Schichten a. d. Spule ist die radiale Dicke des Wicklungsraumes $40 \cdot 2 = 80$ mm; zwischen den Schenkeln werden für die Wicklung gebraucht $2 \cdot 80 = 160$ mm, während 300 vorhanden sind. Die Wicklung hat also reichlich Platz. Bei 10 mm Raum zwischen Eisen und Wicklung ist der mittlere Durchmesser einer Windung $(22 + 38) : 2 = 30$ cm und der mittlere Umfang einer Windung $30 \cdot \pi = 94,2$ cm oder 0,942 m; die Länge des gesamten Kupferdrahtes beträgt somit $14400 \cdot 0,942 = 13570$ m und sein Widerstand

$$w = \frac{13570}{1,54 \cdot 57} = 154,7 \text{ Ohm;}$$

dieses w ergibt bei $E = 220$ Volt einen Strom

$$i = \frac{E}{w} = \frac{220}{154,7} = 1,422 \text{ Ampere,}$$

also etwas mehr, als zu fordern ist.

Die Erwärmungsbedingung, daß auf 1 Watt wenigstens 10 qcm äußerer Spulenoberfläche kommen, ist ebenfalls erfüllt, denn gefordert sind $10 \cdot 220 \cdot 1,422 = 3128$ qcm, während beide Spulenmäntel allein schon $2 \cdot \pi \cdot 38 \cdot 36 = 8595$ qcm aufweisen.

Der vorliegende Magnet enthält 338 kg Eisen und 186 kg Kupfer, sein Gewicht beträgt demnach rund ein Zehntel der gerechneten Last.

§ 70. Rechnungen betreffend die Induktionserscheinungen und die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld.

A. Berechnung einer induzierten Spannung.

Auf Grund der in § 68, J gegebenen Definition der absoluten Stromeinheit gilt der Satz, daß auf ein quer zu einem magnetischen Kraftfluß im Felde $\mathfrak{H} = 1$ stehendes Stromleiterelement von der Strom-

stärke $i_{abs.} = 1$ und der Länge $l = 1$ cm die Kraft $P_{abs.} = 1$ Dyn ausgeübt wird.

Sei dieser Strom $i_{abs.} = 1$ durch Induktion erzeugt, und sei das Leiterelement dazu quer zu den Kraftlinien und zu seiner Längsrichtung um 1 cm verschoben worden, so ist dabei der Kraftfluß $\mathfrak{N} = 1$ (eine Kraftlinie) geschnitten worden. Die Verschiebung erfordert entlang des Weges die Kraft $P_{abs.} = 1$ Dyn, also tritt auf 1 cm Weg die Arbeit $A_{abs.} = 1$ Erg auf.

Geschehe nun die Verschiebung beständig so, daß in der Sekunde 1 cm Weg gegen die Kraft von 1 Dyn ausgeübt wird, so tritt dabei die Leistung

$$L = 1 \text{ Erg/Sek.}$$

auf, und nach dem Satz: „Leistung gleich Spannung mal Stromstärke" folgt dann, daß die am Leiterelement auftretende Spannung die absolute Einheit sein muß. Die mechanische und die elektrische Leistung sind dabei einander äquivalent.

Aus den in § 67 bei Gelegenheit des 5. Versuches gegebenen Proportionalitäten folgt dann weiter, daß an einem beliebigen Draht die absolute durch Induktion erzeugte Spannung unmittelbar durch die in der Sekunde geschnittene Kraftlinienzahl des ganzen Drahtes (Summe algebraisch genommen) ausgedrückt ist.

Die Richtigkeit dieser Entwicklung ist auch aus den Dimensionen zu erkennen (vgl. § 68, I und L):

$$[E] = [\mathfrak{N} : t] = \left[l^{\frac{3}{2}} \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-2}\right].$$

Um von absoluten Einheiten aus auf das elektrotechnische Maßsystem zu kommen, ist zu bedenken, daß 10^7 Erg/Sek. = 1 Watt darstellen, und daß die absolute Stromeinheit 10 mal so groß ist wie 1 Ampere, also erhalten wir aus der sekundlich geschnittenen Kraftlinienzahl die Spannung in Volt durch Division dieser Zahl mit 10^8;*) werde, wie bereits früher, die in der Sekunde geschnittene Kraftlinienzahl als die Schnittgeschwindigkeit bezeichnet (als Formelgröße geschrieben $\mathfrak{B}$), so folgt daraus

$$E_{\text{Volt}} = 10^{-8} \cdot \mathfrak{B}; \text{ }^{\text{Wiss. 2)}}$$

bedeutet $\mathfrak{B}$ die Schnittgeschwindigkeit eines ganzen Stromkreises (die algebraisch summierte Kraftlinienzahl/Sekunde für den ganzen Kreis), so wird E die am ganzen Kreise durch Induktion erzeugte Spannung, die als EMK des Kreises zu gelten hat, wenn andere ebenfalls Spannung erzeugende Erscheinungen (elektrolytische Polarisationsspannungen, Thermospannungen usw.) nicht vorhanden sind.

Über die Richtung (das Vorzeichen) von E bzw. die Richtung (das Vorzeichen) des durch E erzeugten Stromes gibt das durch die Regel der rechten Hand angedeutete Verfahren für eine bestimmte Richtung (ein bestimmtes Vorzeichen) von $\mathfrak{B}$ Aufschluß.

* Vgl. § 68, L.

1. Beispiel. Es liege ein homogenes magnetisches Feld von der Breite $b = 20$ cm und der Feldstärke $\mathfrak{H} = 5000$ Kraftl./qcm vor. Durch dieses Feld bewege sich normal zu den Kraftlinien ein Draht, der mit einer Länge (gleich der Feldbreite) $l = 20$ cm im Felde liegt.

Wieviel Spannung wird erzeugt, indem sich der Draht durch das Feld mit einer räumlichen Geschwindigkeit $v = 2000$ cm/Sek. hindurchbewegt?

Die Schnittgeschwindigkeit des Drahtes beträgt:

$$\mathfrak{B} = b \cdot \mathfrak{H} \cdot v = 20 \cdot 5000 \cdot 2000 = 200\,000\,000 \text{ Kraftl./Sek.};$$

daraus folgt die am Draht induzierte Spannung

$$E = 10^{-8} \cdot \mathfrak{B} = 10^{-8} \cdot 200\,000\,000 = 2 \text{ Volt.}$$

2. Beispiel. Eine in sich geschlossene Kupferspule von $z = 10$ Windungen und einem Widerstande $w = 0{,}03$ Ohm wird mit einem Teil ihres Umfanges durch ein $b = 6$ cm breites magnetisches Feld von $\mathfrak{H} = 7000$ Kraftl./qcm mit $v = 3$ cm/Sek. bewegt. Wie groß ist die induzierte Stromstärke?

Die Schnittgeschwindigkeit beträgt:

$$\mathfrak{B} = z \cdot b \cdot \mathfrak{H} \cdot v = 10 \cdot 6 \cdot 7000 \cdot 3 = 1\,260\,000 \text{ Kraftl./Sek.}$$

Daher ist die induzierte Spannung:

$$E = 10^{-8} \cdot \mathfrak{B} = 10^{-8} \cdot 1\,260\,000 = 0{,}0126 \text{ Volt.}$$

Für den induzierten Strom gilt:

$$i = \frac{E}{w} = \frac{0{,}0126}{0{,}03} = 0{,}42 \text{ Ampere.}$$

B. Die Selbstinduktion.

Die durch Selbstinduktion (vgl. § 67, 11. Versuch) an einem Leiter erzeugte Spannung E ist in Abwesenheit von Eisen proportional zur Stromänderung in der Zeiteinheit:

$$E = S \cdot i : t;$$

die Proportionalitätskonstante S heißt der Selbstinduktionskoeffizient des betreffenden Leiters. Es folgt aus obiger Gleichung:

$$[S] = [E \cdot t : i]$$

und mit Hilfe von Absätzen J und L des § 68:

$$[S] = [l \cdot m^0 \cdot t^0];$$

für das absolute Maßsystem gilt:

Der Selbstinduktionskoeffizient 1 = 1 [cm].

Die absolute Einheit des Selbstinduktionskoeffizienten liegt vor, wenn bei der Stromänderung von 1 abs. Stromeinheit in der Sekunde die abs. Spannungseinheit entwickelt wird.

Für das elektrotechnische Maßsystem gilt:

Den Selbstinduktionskoeffizienten 1 besitzt derjenige Leiter, in dem 1 Volt durch die gleichmäßige Änderung von 1 Ampere in der Sekunde induziert wird. Diese praktische Einheit heißt das Henry.

Daraus folgt:

$$1 \text{ Henry} = 10^8 : 10^{-1} = 10^9 \text{ [cm]}.$$

Das Gesetz, nach dem ein Strom unter Gegenwart von Selbstinduktion ansteigt, ist von der Wissenschaft untersucht worden und es hat sich die Formel herausgestellt:

$$i = \frac{E}{W}\left(1 - e^{-\frac{W}{S} \cdot t}\right),$$

worin zu verstehen ist unter

i = Augenblickswert der Stromstärke (in Ampere),
t = Zahl der Sekunden zwischen dem Anschließen und dem betrachteten Augenblick,
E = Spannung der Elektrizitätsquelle (in Volt),
W = Widerstand des Stromkreises (in Ohm),
e = Basis des natürlichen Logarithmensystems = 2,718,
S = der Selbstinduktionskoeffizient des betreffenden Kreises.

Aus obiger Gleichung geht das Gesetz des Anstieges nicht ohne weiteres anschaulich hervor. In Fig. 221 ist der Verlauf des Anstieges graphisch dargestellt, indem für die Werte der Gleichung bestimmte Annahmen gemacht worden sind. In Richtung der wagerechten Achse ist die Zeit, in Richtung der senkrechten jedesmal die zugehörige Augenblicksstromstärke aufgetragen. Mathematisch genau würde der Höchstwert erst nach unendlich langer Zeit eintreten.

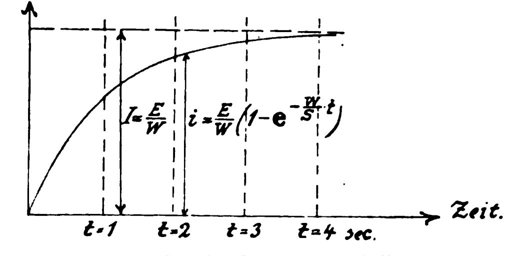


Fig. 221. Anstieg des Stromes bei Selbstinduktion.

Wird in einem Kreise plötzlich die Spannung weggenommen, ohne daß der Kreis unterbrochen wird,* so fällt der Strom nach einer Kurve

$$i = \frac{E}{W} \cdot \left(e^{-\frac{W}{S} \cdot t}\right),$$

wobei die oben genannten Bezeichnungen gelten, nur bedeutet t die Zeit nach Wegnahme der Spannung. Der Abfall ist für bestimmte Werte von E, W und S in dem Diagramm Fig. 222 gezeichnet.

---

* Vgl. Schaltung Fig. 203.

Für gerade Drähte hat die Selbstinduktion auch bei beträchtlicher Länge verhältnismäßig geringen Einfluß. Gerade Kupfer- und Bronzeleitungen besitzen auf das km Länge einen Selbstinduktionskoeffizienten von 0,0025 bis 0,0030 Henry. Für Eisendraht ist er wesentlich größer.

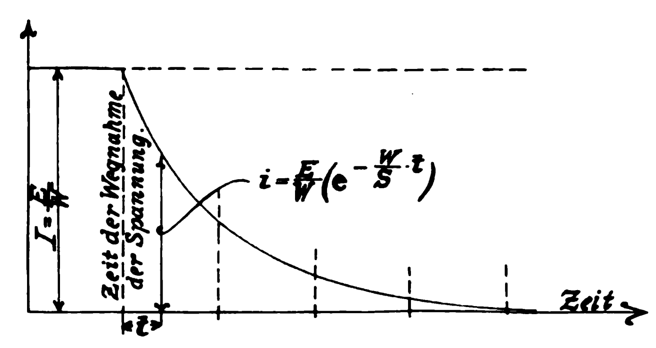


Fig. 222. Abfall des Stromes bei geschlossenem Kreise.

Für Spulen, zunächst ohne Eisen, die bestimmte äußere Abmessungen haben, ist der Selbstinduktionskoeffizient proportional zum Quadrat der Windungszahl z. Das Quadrat entsteht, weil zunächst das Feld proportional zu z und weiterhin die induzierte Spannung bei einem bestimmten Felde abermals proportional zu z ist.

Man hat für kreisringförmige Spulen, deren Abmessungen nach Fig. 202 durch R und r bestimmt sind, den Selbstinduktionskoeffizienten berechnet zu

$$S = 4\pi z^2 \left(R - \sqrt{R^2 - r^2}\right) \cdot 10^{-9} \text{ Henry}.$$

Für Spulen ähnlichen Querschnittes ändert sich der Wert um einige Prozent.

Enthält eine Spule einen Eisenkern, so vergrößert sich die Selbstinduktion beträchtlich. Die Verhältnisse lassen sich in diesem Fall jedoch durch Rechnung nicht genügend scharf ermitteln. Es kommt hier die Durchlässigkeit μ des Eisens in Frage, die je nach der Belastung einer Spule verschieden und veränderlich ist. Bei Gegenwart von Eisen steigt die Kraftlinienzahl nicht mehr proportional zum Strome; daher ist mit einer folgegleichen Änderung des Stromes um eine bestimmte Amperezahl in der Sekunde nicht mehr eine konstante Selbstinduktionsspannung verbunden, sondern ihr Verlauf richtet sich nach den durch die Veränderung von $\mathfrak{H}$ entstehenden Änderungen von $\mathfrak{B}$ (vgl. beispielweise Fig. 214). Daher hat man, um

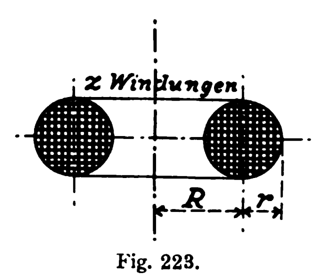


Fig. 223.

durch Einbringung von Eisen in Spulen wesentlich vergrößerte Selbstinduktionswirkungen zu erreichen, mit geringen Feldstärken zu arbeiten (bis zu etwa $\mathfrak{H} = 10$, dem in Fig. 214 ein $\mathfrak{B} = 13100$ entspricht). Der ohne Eisen gerechnete Selbstinduktionskoeffizient wird dadurch in rohester Annäherung bei Einbringung eines in sich geschlossenen Eisenkörpers in dem Maße des bei dem Höchstwert für $\mathfrak{H}$ auftretenden Wertes μ vergrößert (z. B. für das Eisen der Figuren 213 und 214 für $\mathfrak{H} = 10$ ver-1310fach).

3. Beispiel. Eine Spule nach Fig. 223 habe die Abmessungen

$$R = 14 \text{ cm}$$
$$r = 7 \text{ cm}.$$

Sie bestehe aus 1600 Windungen eines Drahtes von 2 mm Kupferdurchmesser, dessen Widerstand 7,8 Ohm betragen möge.

1. Wie groß ist der Endwert der Stromstärke, wenn die Spule an 100 Volt angeschlossen wird?
2. Wie groß ist die Stromstärke nach 0,1 Sekunde, wenn die Spule kein Eisen enthält?

Zu 1. Der Endwert der Stromstärke rechnet sich nach dem Ohmschen Gesetz:

$$I = \frac{E}{W} = \frac{100}{7,8} = 12,82 \text{ Ampere.}$$

Zu 2. Die Stromstärke nach 0,1 Sekunde beträgt:

$$i = 12,82\left(1 - e^{-\frac{7,8 \cdot 0,1}{S}}\right).$$

Dabei ergibt sich

$$\begin{aligned} S &= 4\pi \cdot 1600 \cdot 1600 \cdot (14 - \sqrt{14^2 - 7^2}) \cdot 10^{-9} \\ &= 0,061 \text{ Henry;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i &= 12,82\left(1 - 2,718^{-\frac{7,8 \cdot 0,1}{0,061}}\right) \\ &= 12,82(1 - 0,00000278) \text{ Ampere.} \end{aligned}$$

Die Stromstärke hat bis auf rund 3 Millionstel ihren Höchstwert erreicht.

C. Die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld.

Im Anschluß an den eingangs von A dieses Paragraphen ausgesprochenen Gedanken, betreffend die Kraftwirkung auf das Leiterelement 1 im Felde 1 und in Anwendung des in § 67 bei Gelegenheit des 8. Versuches enthaltenen Satzes: „Die Kraftwirkung zwischen Strom und Feld ist proportional zum Produkt aus der Feldstärke, der Stromstärke und der wirksamen im Felde liegenden Drahtlänge“, kann geschrieben werden:

$$P_{\text{abs.}} = \mathfrak{H} \cdot i_{\text{abs.}} \cdot l_{\text{cm}},$$

wobei $\mathfrak{H}$ das (unabgelenkte, in dem Beispiel der Fig. 198 geradlinig gezeichnete) magnetische Feld, $i_{\text{abs.}}$ die normal zu den Kraftlinien

fließende absolut gemessene Stromstärke, l die wirksame, im Felde $\mathfrak{H}$ liegende und in cm ausgedrückte Länge des Stromweges, sowie P die normal zu $\mathfrak{H}$ und i (nach der Regel der linken Hand) auftretende und in Dyn ausgedrückte Kraft bedeutet.

In technisches Maß umgerechnet und unter Voraussetzung einer Erdbeschleunigung von 981 cm/Sek.[2] wird aus obigem Ausdruck:

$$P_{kg} = \frac{1}{9810000} \cdot \mathfrak{H} \cdot i_{Amp.} \cdot l_{cm}.$$

An Stelle des $\mathfrak{H}$ und i enthaltenden Ausdruckes kann auch nur mit Feldern oder, falls beide Felder durch elektrische Ströme erzeugt sind, nur mit Strömen gerechnet werden. Die eine Rechnungsweise ersetzt die andere. Es ist für technische Rechnungen üblich, stets diejenigen Rechnungsmethoden herauszugreifen, die für den gerade vorliegenden Fall am bequemsten sind. Bequem ist es nur mit Strömen zu rechnen, falls für die vorhandenen Erscheinungen kein Eisen zu berücksichtigen ist.* In diesem Falle kann für ein bestimmtes vorliegendes, von einem Strome i_1 durchflossenes Leitersystem gegen ein ebenfalls bestimmtes, von i_2 durchflossenes System, das relativ zum ersteren räumlich unverändert ist, gesetzt werden:

$$P = c \cdot i_1 \cdot i_2,$$

wobei c eine zu den gewählten Maßeinheiten und zu der betreffenden Kombination gehörige Konstante bedeutet; sind die beiden aufeinander wirkenden Ströme gleich ($i_1 = i_2 = i$), wie das z. B. bei hintereinandergeschalteten Teilen der Fall ist, so wird daraus:

$$P = c \cdot i^2;$$

das c der beiden Ausdrücke ist eine unbenannte Zahl, denn wie sich aus § 68, D und J ergibt, gilt die Dimensionsformel:

$$[P] = [i^2].$$

4. Beispiel. Ein Strom $i = 30$ Ampere fließe in $z = 100$ hintereinandergeschalteten Einzelleitern, deren Stromrichtung so gewählt ist, daß sich alle Einzelkräfte addieren, normal zu den Kraftlinien durch ein magnetisches Feld $\mathfrak{H} = 5000$ Kraftl./qcm von der Breite $b = 20$ cm, so daß die wirksame Länge jedes Einzelleiters ebenfalls $l' = 20$ cm beträgt. Eine wie große Kraft tritt an dem Leitersystem normal zum Felde und zum Strome auf?

Die gesamte wirksame Länge beträgt:

$$l = z \cdot l' = 100 \cdot 20 = 2000 \text{ cm};$$

damit ergibt sich die Kraft:

$$P = \frac{1}{9810000} \cdot \mathfrak{H}\, i\, l = \frac{5000 \cdot 30 \cdot 2000}{9810000} = 30{,}58 \text{ kg}.$$

---

* In diesem Falle ist es üblich, von einer dynamischen Wirkung zu reden.

5. Beispiel. Von den $z = 100$ Drähten des vorigen Beispieles seien $z_g = 20$ Drähte innerhalb des Feldes in entgegengesetzter Richtung von dem Strome i durchflossen, während alles übrige gleich bleibt. Eine wie große Kraft tritt nunmehr an dem gesamten Leitersystem auf?

Die wirksame Länge beträgt nunmehr

$$l = (z - 2\,z_g) \cdot l' = 60 \cdot 20 = 1200 \text{ cm}$$

und damit ergibt sich die Kraft

$$P = 30{,}58 \cdot \frac{1200}{2000} = 18{,}35 \text{ kg}.$$

6. Beispiel. Zwei stromdurchflossene Spulen üben bei $i_1 = 20$ Ampere in der ersten und $i_2 = 0{,}05$ Ampere in der zweiten Spule eine Kraft $P = 10$ g aufeinander aus. Wie groß ist die Kraft zwischen beiden Spulen derselben gegenseitigen Lage bei $i'_1 = 30$ Ampere und $i'_2 = 0{,}06$ Ampere?

Gemäß dem Gesetz:

$$P = c \cdot i_1 \cdot i_2$$

ergibt sich für den vorliegenden Fall:

$$c = \frac{P}{i_1 \cdot i_2} = \frac{10}{20 \cdot 0{,}05} = 10;$$

im zweiten Falle tritt die Kraft auf:

$$P' = c \cdot i_1' \cdot i_2' = 10 \cdot 30 \cdot 0{,}06 = 18 \text{ g}.$$

---

9. Kapitel.

Die Gleichstromerzeuger.

§ 71. Vorbemerkungen.

Es liege ein Magnet vor, der zwischen seinen Polen einen zylindrischen Teil aus Eisen besitzt. Beispielsweise sei der Magnet nach Fig. 224 als Hufeisen gedacht; er besitze zwischen den Polen eine Bohrung; konzentrisch mit den Zylinderflächen dieser Bohrung sei der eiserne Zylinder angebracht, so daß die Kraftlinien zu ihrem wesentlichen Teile radial nach Angabe der Fig. 224 verlaufen, nämlich von dem links befindlichen Nordpol durch das Eisen des zylindrischen Teiles zu dem rechts befindlichen Südpol und von da durch das Hufeisen zur Ausgangsstelle zurück. Wie die Kraftlinien zustande kommen, ob es sich um einen Stahlmagneten oder einen Elektromagneten handelt, ist vor der Hand gleichgültig.

Bewegt man durch das radiale Feld einen parallel zur Zylinderachse verlaufenden und in Fig. 224 im Querschnitt sichtbaren Draht

nach Angabe der Pfeile oder umgekehrt, so wird nach dem 1. Versuch von § 67 zwischen seinen Enden Spannung erzeugt. Es würde bei dem Drahte links und bei der angegebenen Bewegungsrichtung (Regel der rechten Hand!) das Bestreben zu einem vom Beschauer aus in die Bildebene hineinfließenden Strom auftreten, während bei dem gleichen Umlaufssinn auf der rechten Seite (nach derselben Handregel) das Bestreben zu einem auf den Beschauer zu gerichteten Strom vorhanden sein würde.

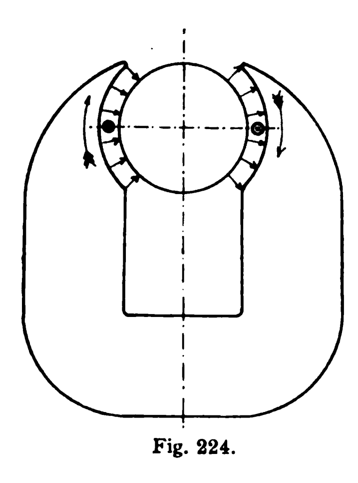


Fig. 224.

An Stelle der Bewegung des Drahtes im Luftraume bei feststehendem Eisenkörper kann auch die Bewegung des Drahtes durch das Feld dadurch erfolgen, daß man den Draht isoliert auf dem zylindrischen Körper befestigt und mit dem Körper dreht. Für den Draht ist an der Wirkung dadurch nichts geändert.

Die Spannung zwischen den Enden eines einzigen Drahtes ist für normale Feldstärken, normale Bemessung in Richtung der Achse und für normale Geschwindigkeiten (vgl. § 70, 1. Beisp.) gering. Zum Erreichen von Spannungen normaler Höhen ist die Hintereinanderschaltung vieler Drähte erforderlich.

Befindet sich an dem Umfang des Eisenkörpers Draht neben Draht, zunächst ohne Verbindung der Drähte untereinander, und dreht sich dieses Gebilde im Sinne der Fig. 224, so hat jeder auf der linken Seite befindliche Draht vorn einen Minuspol und hinten einen Pluspol, während auf der rechten Seite die Pluspole vorn, die Minuspole hinten auftreten.

Wie bei der Verbindung der einzelnen Drähte vorzugehen ist, damit man zugleich die Möglichkeit der Abnahme eines Gleichstromes erhält, zeigen die nächsten Paragraphen. Der Eisenkörper samt seinem Drahtsystem heißt der Anker (die Armatur).

§ 72. Das Schema der gewöhnlichen Ringwicklung.

Der Eisenkörper besitzt konzentrisch zur Achse eine weite Bohrung. Durch diese Bohrung führt man einen Verbindungsdraht jedesmal von dem hinteren Ende des einen Ankerdrahtes zu dem vorderen Ende des benachbarten Drahtes. Der Vorgang wiederholt sich in der gleichen Weise, bis der ganze Eisenkörper rundum mit einer in sich geschlossenen Wicklung umgeben ist, so wie es Fig. 225 für den Fall von 16 Drähten schematisch darstellt.

Die eingezeichneten Pfeile an den Drähten geben die Richtung an, nach der ein Strom bei der angegebenen Feld- und Bewegungsrichtung zu fließen bestrebt ist. An der Wicklung treten zwei aus-

gezeichnete Stellen P_1 und P_2 auf, nämlich in der Symmetrieebene zwischen beiden Polschuhen. Bei dem in der Zeichnung oben liegenden Draht sucht von zwei Seiten Elektrizität aus der Wicklung zu-, bei dem unten liegenden Draht nach zwei Seiten hin Elektrizität in die Wicklung hinein abzuströmen. An diesen Stellen lassen wir leitende Teile (im Schema zwei Federn f_1 und f_2) schleifen, von denen bei dem Umlauf des Ringes ein Strom abgenommen werden kann.

Da der Anker als Stromquelle dient, ist f_1 als der positive, f_2 als der negative Pol anzusehen. Ohne Verbindung im äußeren Schließungs-

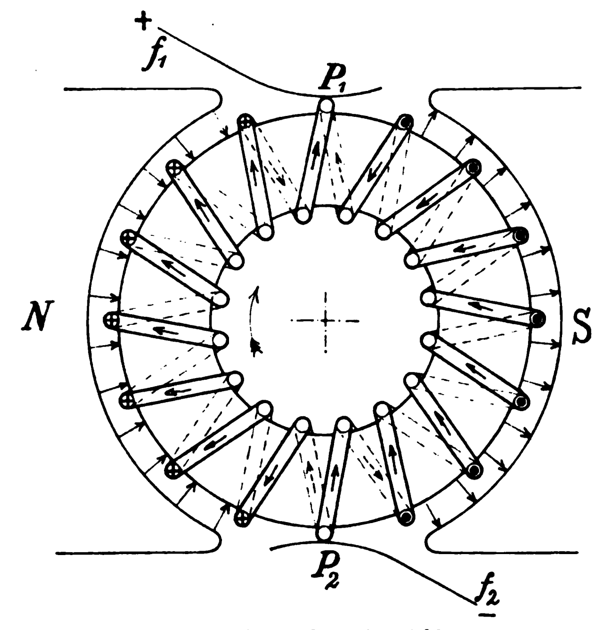


Fig. 225. Schema der Ringwicklung.

kreise tritt kein Strom auf. Da beide Wicklungshälften, die linke und die rechte, bei der Drehung stets gleichviel Ankerdrähte enthalten, die mit der gleichen Geschwindigkeit die gleiche Kraftlinienzahl auf beiden Seiten schneiden, herrscht rechts und links die gleiche Schnittgeschwindigkeit und folglich auch die gleiche elektromotorische Kraft.

Für einen Stromkreis, der nur durch die Ankerwicklung gebildet wird, sind beide rechts und links auftretende elektromotorische Kräfte gegeneinandergeschaltet, die wegen ihrer Gleichheit (vgl. § 33) keinen Strom innerhalb der Wicklung aufkommen lassen. Es sind die einzelnen Drähte am Umfange des Ankers so geschaltet, wie es einer Batterieschaltung entspricht nach Art von Fig. 226.

Wird durch Anschließen eines Außenkreises an die mit + und − bezeichneten Pole ein neuer Stromkreis gebildet, so sind für diesen

Stromkreis die beiden Hälften der Stromquelle parallelgeschaltet, die ihres gleichen Widerstandes wegen gleichmäßig an der Stromführung beteiligt sind.

Ist die Stromstärke im einzelnen Ankerdraht mit i und der Strom im Außenkreise mit I bezeichnet, so gilt daher

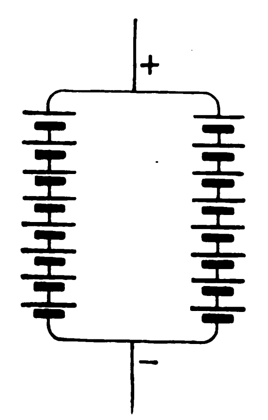


Fig. 226. Vergleich einer Akkumulatorenschaltung mit einem Anker.

$$I = 2 \cdot i;$$

liegen im ganzen l Meter Draht vom Querschnitt q und vom spezifischen Widerstande c auf dem Anker, so ist der Ankerwiderstand

$$W_A = \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{2q} \cdot c = \frac{l \cdot c}{4q}.$$

Führt der Anker Strom, so sind bei seinem Umlauf die (nach § 70, 4. Beisp. zu rechnenden) Kräfte zwischen Strom und Feld zu überwinden. Es wird daher mit dem Anker mechanische Leistung in elektrische Leistung umgesetzt.

Die durch Fig. 225 angedeutete Wicklungsart heißt Ringwicklung, der Eisenkörper samt dieser Wicklung heißt Ringanker. Von technischer Bedeutung war das Auftreten dieses Ankers durch Gramme [Hist. 48]).

Die Abnahme von Gleichstrom ist nur dadurch möglich, daß wenigstens zwei parallelgeschaltete Hälften der Wicklung vorhanden sind, indem unter den Schleifkontakten die der Induktion ausgesetzten Leiter einzeln von der einen auf die andere Seite geschoben werden. Während der eine sich oben von links nach rechts begibt, bewegt sich gleichzeitig ein anderer unten von rechts nach links.

§ 73. Das Schema der gewöhnlichen Trommelwicklung.

Da bei der Drehung eines Ankers an den einzelnen Drähten auf jeder Stirnseite ungleichnamige elektrische Pole gegenüberliegen, erhält man eine Wicklungsmöglichkeit dadurch, daß jedesmal zwei ungefähr diametral gegenüberliegende Drähte direkt an den Stirnseiten miteinander verbunden werden. Die Verbindungen müssen dabei so gelegt sein, daß erstens ein fortlaufender Wicklungssinn und zweitens eine Teilung der Wicklung in zwei parallelgeschaltete Hälften zustande kommt.

Für ein Beispiel von 16 Ankerdrähten ist dieser Gedanke in Fig. 227 dargestellt. Durch einfache und durch gestrichene Zahlen sind die beiden Wicklungshälften für die betreffende Stellung des Ankers voneinander unterschieden.

Der Zug der Wicklung erfolgt in beiden Wicklungshälften nach der Reihenfolge der Zahlen. Außerdem ist verbunden 1 mit 8′ und 1′ mit 8, so daß eine in sich geschlossene Wicklung zustande kommt.

Die Abbildung ist so gedacht, daß die ausgezogenen Linien Verbindungsdrähte auf der Vorderseite darstellen, die gestrichelten Linien Verbindungsdrähte auf der Rückseite. Verfolgt man nun den Verlauf der Ströme, die in dieser Wicklung bei der angegebenen Umlaufs- und Feldrichtung induziert werden können, so sieht man: Bei dem einen der Verbindungsdrähte, die zunächst der Symmetrieebene liegen, kann nach zwei Seiten hin Elektrizität abströmen; bei dem anderen kann von zwei Seiten her Elektrizität zuströmen. Zwei Schleifkontakte, die jedesmal mit diesen beiden Drähten in Verbindung sind, gestatten also bei der Drehung eine fortwährende Stromabnahme.

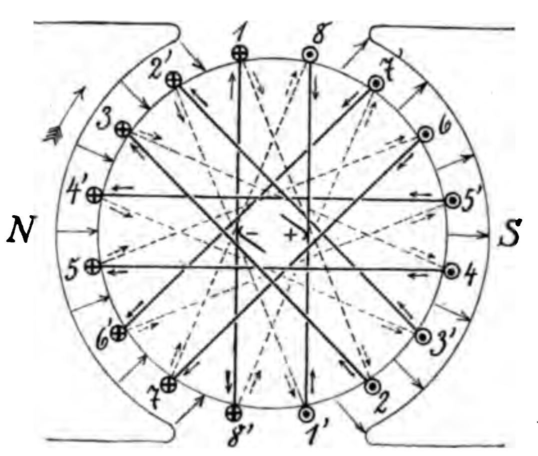


Fig. 227. Schema der Trommelwicklung.

Für den allgemeinen Fall ist das Gesetz zu befolgen, daß mit jeder um das Eisen gelegten Schleife um einen bestimmten Winkel im gleichen Drehsinn weitergeschritten wird, wobei erst nach zweimaligem Umschreiben des Umfanges die Wicklung in sich zu schließen ist. Im Schema Fig. 227 liegen die Drähte der zweiten Umkreisung auf Mitte der beim ersten Umkreisen angewendeten Teilung. Die gesamte Zahl der Drähte muß so gewählt sein, daß bei Anwendung gleichen Fortschreitens bei jeder Windung sich nach einmaligem Umkreisen die Drähte in die zwischen den vorhandenen Drähten gebildete Lücke legen.

Damit das erfüllt werden kann, muß die Zahl der Drähte rundum durch 4 teilbar sein.

In bezug auf die Schaltung des Ankers gilt ebenfalls der durch Fig. 226 ausgedrückte Vergleich und das, was unter dem Ringanker über Außenstrom und Ankerwiderstand gesagt ist.

Die durch Fig. 227 angedeutete Wicklungsart heißt die Trommelwicklung, der Eisenkörper mit dieser Wicklung der Trommelanker. Er rührt von Hefner-Alteneck[Hist. 50]) her.

§ 74. Einige Vorzüge und Nachteile beider Wicklungsarten.

Die bisherigen Zeichnungen der Ankerwicklungen geben nur ihr Schema; aber schon das Schema läßt erkennen, welche Unterschiede zwischen beiden Wicklungsarten bestehen.

Der Ring besitzt den Vorzug der größeren Einfachheit sowie der

leichteren Übersichtlichkeit und den Vorzug, daß zwei benachbarte Drähte jedesmal nur so viel Spannung gegeneinander aufweisen, als im einzelnen Leiter erzeugt wird. Daher ist kein Durchschlagen der Isolierung von Draht zu Draht zu befürchten. Etwa vorkommende Beschädigungen sind leicht erkennbar und leicht auszubessern, da jeder Teil der Wicklung unabhängig vom anderen ausgewechselt werden kann. Dabei tritt hingegen der Nachteil auf, daß er viel Kupfer erfordert, denn zwischen den Leitern treten lange Verbindungsdrähte auf; sowohl an den Stirnseiten als auch innerhalb der Bohrung laufen Verbindungsdrähte, d. h. Drähte, die nichts zur Spannungserhöhung beitragen. Sie erhöhen nur den Widerstand des Ankers.

Es muß normalerweise mehr als die doppelte Drahtlänge gegenüber der wirksamen durchlaufen werden. Auch der Umstand, daß der Draht bei der Herstellung des Ringes oftmals durch die* Bohrung durchgezogen werden muß, spricht zuungunsten des Ringes. Dazu kommt ein weiterer Nachteil, daß die Bohrung einen großen Teil des Ankerquerschnittes wegnimmt, der zur Durchleitung einer größeren Kraftlinienzahl besser verwendet werden könnte.

Der Vorzug der Trommel besteht im wesentlichen darin, daß sie die Materialien besser ausnuzt. Der Ankerquerschnitt ist durch Fortfall der großen Bohrung für bestimmten Ankerdurchmesser und für bestimmte Maschinenbreite größer als beim Ring; die Spannung kann infolge der größeren anwendbaren Kraftlinienzahl mit weniger Drähten einen gewissen Wert erreichen als beim Ring gleicher Außenbemessungen. Dazu kommt, daß in normalen Fällen die Länge der Verbindungsdrähte an den Stirnseiten kleiner ausfällt als die Länge der Verbindungsdrähte beim Ring. Trommelmaschinen für gleiche Leistung werden daher kleiner und billiger als Ringmaschinen. Dagegen wird, wenn nicht besondere Vorkehrungen moderner Art getroffen sind, bei der Herstellung der Trommelwicklung an den Stirnseiten leicht ein Wulst von Drähten erzeugt, wobei ein Draht auf den anderen drückt. Nun zeigt das Schema Fig. 227, daß diejenigen Drähte (rechts und links), zwischen denen die ganze in Summa erzeugte Spannung auftritt, sich auf der entgegengesetzten Stirnseite bereits kreuzen; daher schlägt an diesen Stellen leicht die Isolierung durch, besonders wenn die sich kreuzenden Drähte im Wulst zu unterst liegen. Der Durchschlag an dieser Stelle wird erleichtert, weil dort der Druck auf die Drähte am größten ist, und weil die durch den Strom entwickelte Wärme dort am schlechtesten abgeleitet wird, die Temperatur also am höchsten steigt. Ein Mittel gegen das Durchschlagen ist Zwischenlegen von isolierenden Papieren oder getränkten Geweben, Teile, die den Wulst vergrößern und die Wärmeabgabe noch mehr verhindern. Ein Durchschlag im Innern des Wulstes kann nur ausgebessert werden, wenn die ganze Wicklung oder ein großer Teil davon abgenommen wird.

---

* Durch Nabe und Armstern verengte (vgl. Fig. 228).

Trommeln mit Wulsten werden heute kaum mehr gebaut. Die später behandelten Schablonenwicklungen vereinigen die Vorzüge der Trommel und des Ringes.

§ 75. Das Ankereisen und seine Befestigung.

Für das Eisen des Ankers kann man nicht ein massives Stück anwenden, weil darin Wirbelströme erzeugt werden, die das Material erhitzen und einen Arbeitsverlust verursachen würden. Man stellt daher zur Verringerung der Wirbelstromverluste das Ankereisen aus einzelnen Scheiben entsprechend den beim 10. Versuch von § 67 gegebenen Grundsätzen zusammen. Die zweckmäßigste Unterteilung entsteht durch Aufeinanderlegen von Eisenblechen, deren Flächen normal zur Achse verlaufen. Diese Unterteilung liegt quer zur Richtung der induzierten elektromotorischen Kräfte. Die Technik benutzt dazu Bleche von 0,3 bis 0,5 mm Dicke. Die Ringe oder Scheiben werden zuerst ausgeschnitten und dann abwechselnd mit Seidenpapier aufeinander gelegt.

Zu hohe Anzahl der magnetischen Zyklen in der Sekunde, zu hohe magnetische Dichte und die Anwendung zu dicker Bleche führt bei der gleichen Eisensorte zu ungewünschter Höhe der durch Wirbelströme auftretenden Leistungsverluste.

Es ist nicht jedes Eisen als Ankereisen zu verwenden. Infolge der Hysteresis tritt bei der Drehung des Ankers durch den Kraftfluß eine in § 69, D erklärte Arbeit auf, die das schlechtere Eisen nur mit

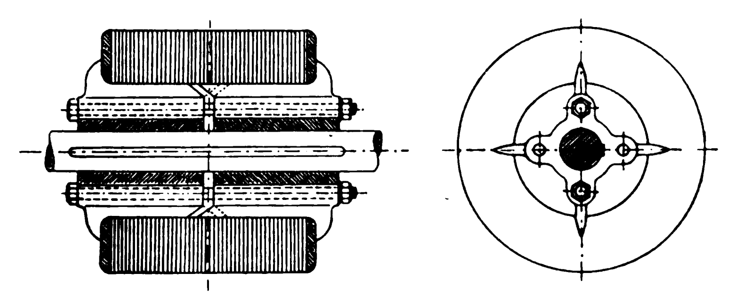


Fig. 228. Aufbau des Ankerkörpers (Ring).

größerem Kraftaufwand drehen läßt, und die sich ebenfalls in Form von Wärme bemerkbar macht. Dieser Übelstand wird durch Anwendung von Materialien mit geringerer Hysteresis (schwedisches Eisen, oder von mehreren einheimischen Hütten als Dynamo- oder Transformatorenbleche besonders hergestellte Erzeugnisse) und durch niedrig gewählte magnetische Dichte, sowie durch niedrig gewählte Zahl der Zyklen in der Sekunde klein gehalten.*

Über die normale Befestigung des Ankereisens beim Ring gibt

* Vgl. die Formeln der Hysteresisarbeit in § 69, D.

Fig. 228 Aufschluß. Die senkrecht schraffierten Flächen bedeuten den Querschnitt durch die Scheiben des Ankereisens. An beiden Stirnseiten ist eine Scheibe aus dickerem Eisen angebracht. Ein aus zwei gleichen Hälften bestehender und normal zur Achse geteilter Armstern zentriert die Bleche, die durch parallel zur Achse verlaufende Bolzen fest aufeinandergepreßt werden. Das Material des Armsternes ist Bronze. Eisen hat den Nachteil, daß ein Teil des Kraftflusses durch die Bohrung geführt wird, wodurch in der Wicklung elektromotorische Kräfte entgegen denen der äußeren Ankerdrähte erzeugt werden.

Damit jede Scheibe zentriert ist, auch an der Lücke zwischen beiden Armsternhälften, wird die Lücke von Arm zu Arm versetzt, wie das Fig. 228 durch ausgezogene und gerissene Linien andeutet. Besser sind hierfür 6 Arme statt 4 anzuwenden, weil dadurch im ungünstigsten Falle die Scheiben an drei Stellen gehalten werden, während sie nach Fig. 228 nur an 2 Stellen gehalten sein würden. Eine Feder zwischen Welle und Armstern hält das Ganze auf der Welle fest.

Bei einer Trommel geschieht die Befestigung des Ankereisens beispielsweise nach Fig. 229. Eine Buchse aus Bronze ist an dem

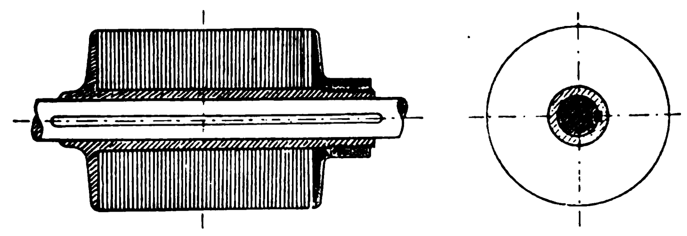


Fig. 229. Aufbau des Ankerkörpers (Trommel).

einen Ende mit einer Scheibe versehen, gegen welche die Ankerbleche gepreßt werden. Eine zweite Scheibe ist auf die Buchse geschoben. Die Buchse besitzt ein Gewinde, auf das eine Mutter mit Gegenmutter geschraubt wird. Durch Anziehen dieser Mutter werden die Ankerbleche aufeinander gepreßt. Die Buchse wird durch Nut und Feder auf der Welle gehalten. Kanten, um die die Wicklung gezogen wird, sind so groß wie möglich abzurunden. Nachdem das Ankereisen fest zusammengezogen ist, wird es an allen Stellen, wo die Wicklung zu liegen kommt, mit Isolierstoff umgeben. Bei Ringankern gilt dasselbe auch von den Armen. Als Isoliermittel wählt man hierzu je nach Größe und Spannung der Maschine getränkte Baumwollgewebe oder Isolierpapiere; Preßspan und Glimmerfabrikate.

Ob die Welle für die Zeit der Herstellung der Wicklung herausgenommen werden kann, hängt von der Konstruktion des Ankers ab. Man sucht das stets zu erreichen, damit die fein bearbeiteten Lagerflächen der Welle nicht beschädigt werden.

§ 76. Die Ausführung der Wicklung nach älteren Methoden und der Kollektor.

Die Figuren 225 und 227 sind nur Schemata für die Ankerwicklungen. Man kann aus praktischen Gründen nicht Schleiffedern anwenden und diese auf den Drähten selbst schleifen lassen. Man ist normalerweise durch die Höhe der zu erreichenden Spannung gezwungen, viele Drähte auf dem Anker unterzubringen, so daß Draht neben Draht, manchmal auch in mehreren Schichten übereinander, zu liegen kommt. Das setzt isolierte Drähte (Baumwollisolation mit später anzubringender Tränkung mit Asphaltpäparaten oder Isolierlacken) voraus. Das Erfordernis eines möglichst geringen Ankerwiderstandes führt nur zur Verwendung von Kupferdrähten; sollen diese Drähte fortlaufend um das Eisen gewickelt werden, so kommt als größter Kupferdurchmesser aus praktischen Gründen selten mehr als 3 bis 4 mm in Frage. Man muß daher besondere Teile für die Stromabnahme schaffen, für die Fig. 230 in Anlehnung an das Schema Fig. 225 die Erläuterung geben mag:

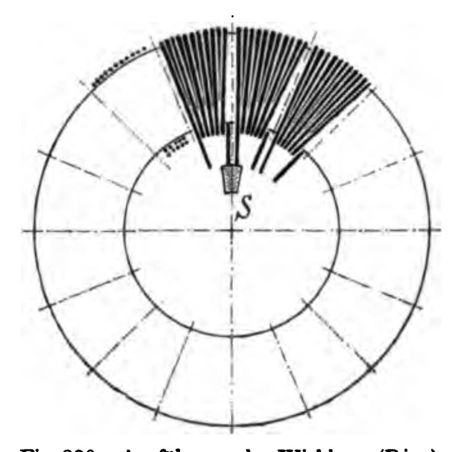


Fig. 230. Ausführung der Wicklung (Ring).

Entsprechend den 16 Drähten des Schemas ist der Anker, der mit Armstern und isolierender Einkleidung zu denken ist, in 16 Teile geteilt. An Stelle jeder Windung im Schema tritt eine Spule, die am äußeren Umfang den Raum ihres Teiles voll einnimmt. Jede Spule bekommt gleich viel Windungen und erhält, durch Drehung des Ankers an dieselbe Stelle gebracht, den gleichen Wicklungssinn. Der Draht jeder Spule wird vorher auf Länge abgeschnitten und auf ein Wicklerschiffchen gebracht, damit man durch den engen Raum in der Bohrung ohne zu große Beschädigung des Drahtes hindurchkommt. Die Enden der Spulen werden bei der Herstellung der Wicklung vorläufig befestigt. Es ist vorteilhaft, wenn der innere Durchmesser des Ringes ungefähr die Hälfte des äußeren beträgt, damit durch Anwendung der doppelten Schichtenzahl innen gegen außen der Anker sauber gewickelt werden kann.

Führt man nun jedesmal das Ende der einen Spule mit dem Anfang der benachbarten an einem Metallsektor S in Fig. 230 zusammen, und wendet man entsprechend der Spulenzahl ein System solcher Metallsektoren an, dessen äußere Zylinderfläche konzentrisch zur Achse angeordnet ist, so kann man auf diesem Gebilde die strom-

abnehmenden Teile schleifen lassen. Ein Metallsektor ist gegen den anderen und jeder gegen die Achse isoliert. Das System dieser Sektoren heißt der Kollektor, die darauf schleifenden Stromabnehmer heißen die Bürsten.

Auch bei einer Trommelwicklung teilt man den Umfang je nach der erforderlichen Spulenzahl ein und wickelt dann so, wie es Fig. 231 zeigt, jedesmal zwei Spulen in paralleler Richtung nebeneinander, erst die senkrecht liegenden, dann die in der Figur wagerecht gezeichneten, dann die unter 45° und wiederum die senkrecht dazu stehenden. Dabei wird jedesmal, wenn zwei Spulen fertig sind, der Anker so gedreht, daß die zu wickelnde Spule relativ zum Wickler die gleiche Lage hat. Zwischen jedes Spulenpaar wird eine besondere Isolierschicht an den Stirnseiten aufgelegt. In dem früheren Schema der Trommelwicklung, Fig. 227, kann man sich jedesmal die an den hinteren Stirnseiten parallel verlaufenden gerissenen Linien als zwei Spulen vorstellen, dagegen die vorn liegenden ausgezogenen Linien als einzelne Verbindungsdrähte von Spule zu Spule, deren jeder an einen Kollektorstab angeschlossen ist.

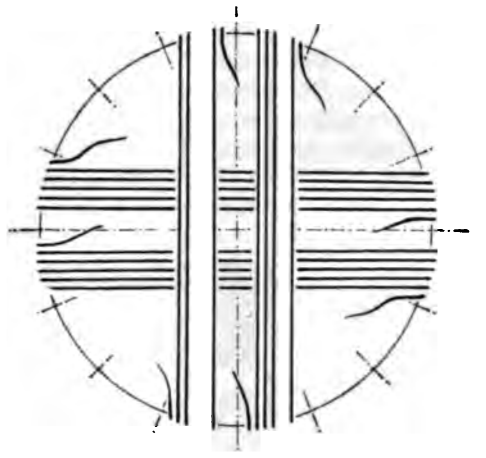


Fig. 231. Ausführung der Wicklung (Trommel).

Um den äußeren Umfang der fertigen Wicklung legt man einige Streifen aus Isolierstoff und darüber zieht man eine reichliche Anzahl von Umgängen eines festen Drahtes, die miteinander verlötet werden. Diese Teile dienen dazu, ein Heraustreten von Drähten der Wicklung durch die Fliehkraft zu vermeiden. Sie werden als Bänder (Bandagen) bezeichnet.

§ 77. Der Kollektor.

Der Kollektor, dessen Zusammenhang mit der Ankerwicklung bereits im vorigen Paragraphen erörtert wurde, ist ein Gebilde von Kupfersektoren, die untereinander und gegen die Welle isoliert sind. Er dient zur Stromabnahme mittels der darauf schleifenden Bürsten.

Seine Stäbe, gewöhnlich Segmente oder Lamellen benannt, unterliegen großen Fliehkräften. Sie müssen durchaus fest aneinandergezogen sein, so daß kein Stab und kein Isolierstoff heraustreten kann; nicht bloß im Sinne des Halbmessers, sondern auch im Sinne des Umfanges darf keine Lockerung eintreten. Da die Stäbe auf Abnutzung bemessen werden, fällt ihre radiale Höhe groß aus. Eine einfache

Kollektorkonstruktion für kleinere Maschinen zeigt Fig. 232, für größere Fig. 233. Gemeinsam bei allen Kollektoren ist die Verwendung eines Kollektorkörpers, der bei dem hier gezeichneten kleinen Kollektor die Form einer Buchse annimmt.

Die Kollektorstäbe bestehen aus reinem Kupfer, das durch einen Ziehprozeß unter Vermeidung des Ausglühens hart geworden ist. Die

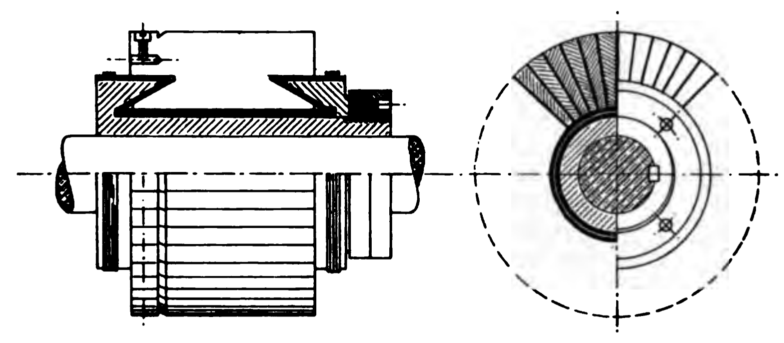


Fig. 232. Kollektor kleinerer Maschinen.

Profile werden so bemessen, daß durch Zusammenlegen einer bestimmten Zahl von Stäben mit Zwischenlagen von Isolierstoff bestimmter Dicke der gewünschte Kollektordurchmesser entsteht. Den Stäben gibt man

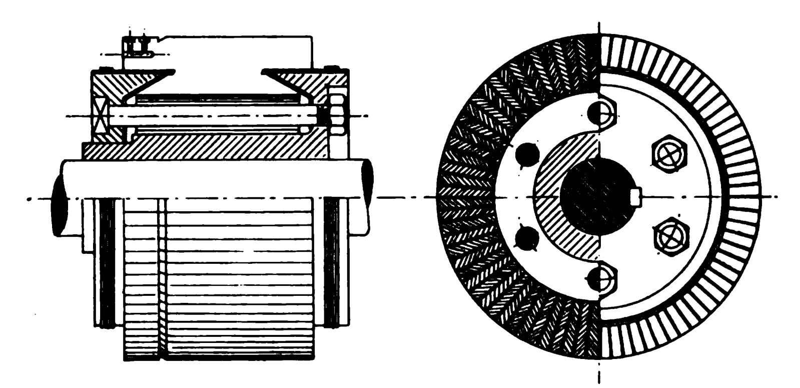


Fig. 233. Kollektor größerer Maschinen.

zunächst roh die in Figuren 232 und 233 angegebene Form, wobei durch zwei Ausschnitte ein Schwalbenschwanz gebildet wird. Die von Grat befreiten Stäbe dieser Form werden mit Hilfe eines außen herumgelegten Ringes mit Zwischenlagen ebenso geformter Isoliermittel zusammengesetzt und in der Kollektorpresse zusammengezogen, die einen möglichst allseitigen radialen Druck ausübt. Geteilte und mit Schrauben anziehbare Eisenringe halten das Gebilde in dem gepreßten Zustande

fest und ermöglichen die Herstellung der Bohrung und der Stirnseiten mit ihren Kegelflächen auf der Drehbank.

Das Isoliermittel ist Glimmer. Zum Abdrehen wird 0,1 m/Sek. Umfangsgeschwindigkeit, spitz geschliffener Drehstahl und geringe Supportverschiebung bei einem Umgang empfohlen. Nach dem Abdrehen prüft man die Isolierung von Stab zu Stab nach dem Schema Fig. 234, in der *G* ein Instrument bedeutet (Galvanometer), das bei sehr schwachen Strömen große Ausschläge zeigt. Stromübergänge von Stab zu Stab rühren gewöhnlich von Spänen her, die sich beim Abdrehen zwischen die Stäbe gesetzt haben und mittels spitzer Werkzeuge entfernt werden. Die außen herumgelegten Ringe erhalten zur Ermöglichung dieser Probe Preßspanunterlagen.

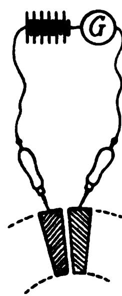


Fig. 234.

Ist das Gebilde so weit in Ordnung, so wird die Kollektorbuchse eingesetzt. Die in Figuren 232 und 233 zwischen den Stäben und der Buchse schwarz gezeichneten Isoliermaterialien, ebenfalls Glimmer, werden in Form einer Hülse und zweier Manschetten aufgebracht. Durch Mutter und Gegenmutter oder durch Bolzen wird das Ganze zusammengezogen.

Nun folgt die Herstellung der äußeren Zylindermantelfläche auf der Drehbank, eine erneute Isolationsprüfung und die Herstellung der Einrichtungen, die zum Anschluß der vom Anker kommenden Drähte erforderlich sind. Sie bestehen entweder aus Schrauben mit Schraubenlöchern zum Einklemmen der Drähte, oder aus Einschnitten, in die die Drähte oder Kupferstreifen gelötet werden.

§ 78. Bürsten, Bürstenhalter, Bürstenbrücke.

Die den Strom vom Kollektor abnehmenden Teile heißen die Bürsten. Sie bestehen meistens aus Kohle, jedoch kommt auch Kupferdrahtgaze in Frage. Der Name Bürsten rührt her von den an Drahtbürsten erinnernden Stromabnehmern der ältesten Maschinen, die durch parallelgelegte Kupferdrähte gebildet wurden. Die zunächst an die Bürsten zu stellenden Anforderungen sind, daß sie den Kollektor nicht unnötig durch Reibung erhitzen oder zerkratzen; ein später weiter zu erörterndes Feuern des Kollektors muß vermieden werden, wozu zunächst ein vollständig runder und gut zentrierter Kollektor mit glatter Oberfläche erforderlich ist; die Bürsten müssen gut aufgeschliffen sein und in ganzer Fläche berühren; Kohlebürsten spannt man, um das zu erreichen, in ihren Bürstenhalter (nach vorheriger angenäherter Herstellung der Zylinderfläche mittels der Schlichtfeile) ein und drückt sie auf den Kollektor auf, wobei zwischen Kollektor und Bürste ein Schmirgelpapierstreifen mit der rauhen Seite zur Kohle gerichtet hin und her gezogen wird. Nach dieser Behandlung stellt sich bei gutem Kollektor, guten Kohlen und gut arbeitenden Maschinen eine Politur auf den Schleifflächen der Kohlen ein, die sich dauernd erhält und

höchstens durch Überlastungen ausbrennt. Die Kollektoroberfläche behält bei gut arbeitenden Maschinen ihre Politur bei, nimmt aber infolge von Oxydbildung eine braune, bisweilen schillernde Farbe an, die nicht zu entfernen ist, da sie zum besseren Arbeiten der Maschine beiträgt. Kollektor und Bürsten zeigen in diesem Fall die geringste Abnutzung. Ein Schmieren von Kollektoren ist, so gut es eben geht, zu vermeiden. Ein Schreien der Bürsten kann vielfach durch leichte Veränderung des Anpressungsdruckes beseitigt werden. Der allergeringste Fetthauch ist im Notfall gewöhnlich ausreichend.

Der Anpressungsdruck der Bürsten soll so gering wie möglich sein. Unrunde und exzentrisch sitzende Kollektoren erfordern, um Abheben der Bürsten durch Massenkräfte zu vermeiden, größeren Anpressungsdruck. Zahlenangaben haben wegen der überall auftretenden geringen Abweichungen von der Rundung keine Bedeutung.

Für die zulässige Strombelastung der Kohlen bei gut arbeitenden Maschinen werden etwa 10 bis 15 Ampere auf das qcm im Höchstfall angegeben. Tatsächlich sind höhere Werte erreicht worden. Auch die Zahl der durch die Bürsten gleichzeitig berührten Kollektorstäbe ist für den Gang der Maschine von Einfluß. Maschinen für große Stromstärken erfordern in Richtung der Achse groß bemessene (breite) Kollektoren mit mehreren nebeneinandergestellten Bürsten. Daß die Kohle sich über den Kollektor zieht (an der schwarzen Färbung erkennbar), ist wegen der dadurch eintretenden mangelnden Isolation zu vermeiden.

Kupferbürsten werden in besonderen Fällen höher beansprucht als Kohlebürsten, etwa mit 20 bis 35 Ampere/qcm, dagegen feuern sie im allgemeinen leichter als Kohlebürsten. Eine Kupferbürste gilt als überlastet, wenn durch das Feuern ihr Drahtgewebe an den Auflagestellen zerstört wird. Bei Kupferbürsten kann das Isoliermittel des Kollektors, falls die Maschinenspannung in der Nähe von 100 Volt beträgt, auch Preßspan sein.

Feuert bei Hin- und Herschieben beider Bürsten in Richtung des Umfanges entweder die eine oder die andere Bürste, so sind die Bürsten meistens nicht richtig eingestellt. Bei Maschinen mit symmetrischem Kraftfluß genügt gewöhnlich die Einstellung nach dem Grundsatz, daß jedesmal von Bürste zu Bürste die gleiche Lamellenzahl liegt. Bei Maschinen mit hufeisenförmigem Magnetgestell (Fig. 224) trifft diese Anforderung nicht immer zu.

Falls bestimmte Lamellen besonders angegriffen werden, liegt ein Isolationsfehler am Anker oder Kollektor oder vorstehendes Isoliermittel vor.

Die Konstruktion der Bürstenhalter richtet sich nach dem Bürstenmaterial. Fig. 235 zeigt eine Bürstenhalterkonstruktion, wie sie für Kupferbürsten sehr verbreitet ist. Durch Lösen der Schraube *a* kann die Bürste nachgestellt werden, nach dem Lösen von *b* kann sie ab-

gehoben oder neu angepreßt werden. Man ist bestrebt, bei diesen Bürstenhaltern folgenden drei besonderen Anforderungen zu genügen:

1. Die Bürste soll, auch wenn sie sich abgenutzt hat, mit ungefähr gleichem Druck auf dem Kollektor liegen.
2. Die Berührungsfläche soll sich bei der Abnutzung der Bürste nicht wesentlich vergrößern.
3. Die Bürste muß bei ihrer Abnutzung auf derselben Stelle des Kollektors bleiben.

Diese Anforderungen werden durch Länge und Form der Federn erreicht, sowie durch Anwendung eines Winkels zwischen Bürste und Kollektorumfang in der Nähe von 45 bis 60 Grad.

Bei Kohlebürsten erfüllen sich diese Anforderungen leicht durch die geringe Abnutzung der Bürsten und durch ihre radiale Stellung,

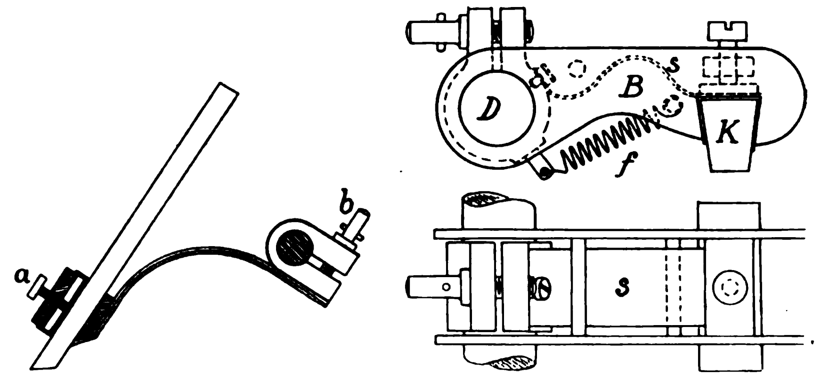


Fig. 235. Kupferbürste mit Halter. Fig. 236. Kohlebürste mit Halter.

die durch geeignete Führung in oder an den Bürstenhaltern gesichert ist. Ein Beispiel hierfür gibt Fig. 236. Die Kohle K ist auswechselbar an dem Bürstenhalter B befestigt, der im wesentlichen aus zwei durch Formnieten auseinander gehaltenen Metallplatten besteht. Die Platten drehen sich leicht um den Dorn D. Die Kohle wird mit Hilfe einer Schraube unter Zwischenlegung eines die Stromverbindung erleichternden Kupferbleches als Keil in eine entsprechende Aussparung der Platten gepreßt. Zwischen den beiden Führungsösen des Bürstenhalters befindet sich ein auf dem Dorn feststellbares Klemmstück, das für die betriebsfertige Maschine angezogen ist. An diesem Teile ist die Feder f befestigt, welche die Bürste mit der Kohle gegen den Kollektor andrückt. Durch Einstellen des Klemmstückes kann die Anpressungskraft geregelt werden. Ein dünner Metallstreifen s führt den Strom von der Kohle zum Dorn.

Ein Beispiel einer Bürstenbrücke ist in Fig. 237 gegeben. Auf den zwei Dornen D_1 und D_2 werden die Bürstenhalter mittels ihrer

Klemmstücke befestigt. Zur Einstellung des funkenlosen Ganges der Maschine müssen die Bürsten konzentrisch zur Achse drehbar angeordnet sein. Man bringt dazu z. B. an der äußeren Umhüllung des Lagers einen Ansatz mit einer Nut an. In diese Nut greift eine Schraube, die in der Bürstenbrücke sitzt. Bei einigem Lockern der

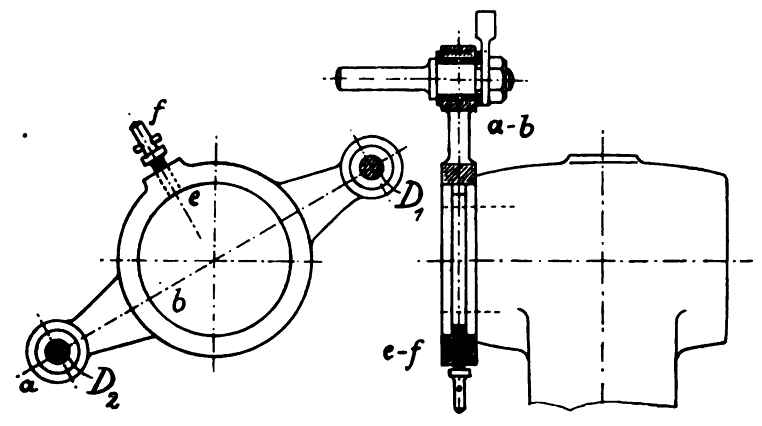


Fig. 237. Bürstenbrücke.

Schraube ist die Bürstenbrücke drehbar, bei weiterem Zurückdrehen der Schraube abnehmbar. Die Dorne der Bürstenhalter sind mit Hilfe eines Futters aus geeignetem Isolierstoff durch die Bürstenbrücke geführt. Unter die Mutter legt man gewöhnlich das Anschlußstück des Bürstenkabels.

Der funkenlose Gang der Maschine wird in den verschiedenen Belastungen durch Verstellen der Bürsten auf dem Kollektor mittels der Bürstenbrücke ausgeprobt.

§ 79. Das Magnetgestell.

Das Magnetgestell dient zur Führung des Kraftflusses. Es wäre denkbar, daß das Gestell aus Stahlmagneten zusammengesetzt wäre, wie das bei kleinen Maschinchen für Kurbelapparate an Telephonen, für Signalzwecke und für Meßzwecke (Isolationsprüfer) tatsächlich geschieht. Für größere Maschinen ist aber ein solches Verfahren nicht anwendbar, weil es zu teueren und im Betriebe nicht regelbaren Maschinen führen würde. Man benutzt vielmehr zur Erzeugung des Feldes Elektromagnete, indem man an beliebiger Stelle um das Eisen eine Wicklung legt, die als Feld-, Magnet-, Schenkel- oder Erregerwicklung bezeichnet wird.

Es kommt in jedem Falle darauf an, daß eine bestimmte Anzahl von Einheitslinien* den Anker durchsetzt. Linien, die im Magnetgestell erzeugt werden, aber den Anker verfehlen, heißen Streulinien. Ein

* Vgl. die spätere Berechnung.

Beispiel für den Verlauf von Streulinien ist durch Fig. 288 gegeben, in der die Streulinien gerissen, die nutzbringenden Linien ausgezogen gezeichnet sind. Alte Maschinen bestimmter Typen streuten sehr, und auf den Streulinien beruhte auch die Magnetisierung von Eisenteilen, die in die Nähe der Maschinen gebracht wurden. Moderne Maschinen halten den Prozentsatz des Streuverlustes gering.

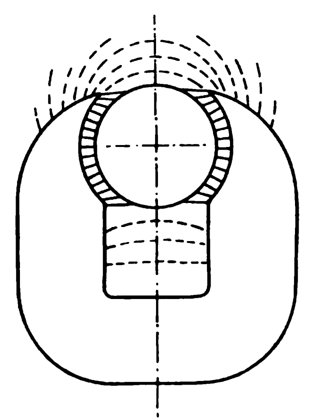


Fig. 238. Streulinien.

Erfolgt der Schluß der Kraftlinien

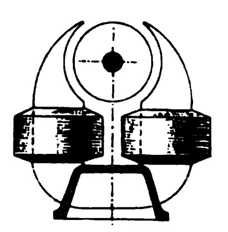


Fig. 239. Gewöhnliche Hufeisen-Type.

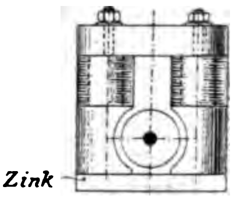


Fig. 240. Verbesserte Edison-Type.

von den Polen aus einseitig, wie das in den bisherigen Skizzen Figg. 224 und 238 angedeutet ist, so heißt das Gestell hufeisenförmig; solche Gestelle haben Nachteile, vor allem auch den, daß sie die Ankerwelle durch einseitigen magnetischen Zug stark auf Biegung beanspruchen können.

Hufeisentypen sind durch Figg. 239 und 240 in bezug auf ihren Aufbau angedeutet.

Ein zweiseitiger Schluß des Magnetgestelles vermeidet bei zentrisch liegendem Anker einseitige magnetische Zugkräfte. Man erhält mit

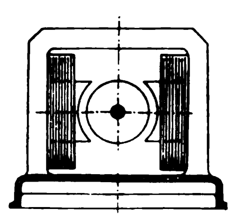


Fig. 241. Lahmeyer-Type.

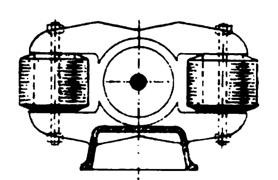


Fig. 242. Manchester-Type.

diesem Gedanken Maschinen, wie sie in den folgenden Beispielen des Lahmeyer- (Fig. 241) und des Manchestertypes (Fig. 242) in Abbildung vorliegen.

§ 80. Das Verhalten einer Maschine mit Fremderregung.

Wird der Erregerstrom einer vorhandenen Stromquelle, nicht dem Anker der Maschine selbst entnommen, so heißt diese Erregungsart

Fremd-, Separat- oder Außenerregung. Die Annahme der Fremderregung führt zu den grundlegenden Vorstellungen von dem Verhalten der Maschinen, das zunächst sich nur auf die Höhe der bei Leerlauf erzeugten Spannung erstrecken möge.

Versieht man eine Maschine mit konstantem Erregerstrom (i) und läßt man den Anker mit verschiedenen Geschwindigkeiten umlaufen, so mißt man Ankerspannungen, die zur Umlaufszahl in der Zeiteinheit direkt proportional sind. Dieses Verhalten wird fürs Auge am besten klargemacht durch eine Schaulinie, die zwischen den Achsen der Umgangszahl / Minute (wagerecht aufgetragen) und der erzeugten Leerlaufspannung (senkrecht aufgetragen) gezeichnet werden kann. Jede Schaulinie, die das Verhalten einer elektrischen Maschine darstellt, heißt eine Charakteristik, so heißt die hier vorliegende und in Fig. 243

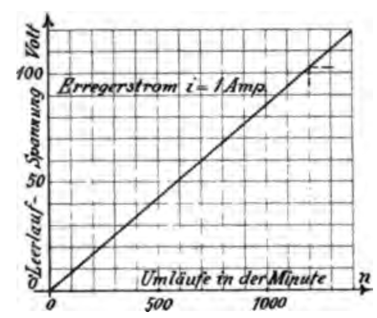


Fig. 243. Leerlaufcharakteristik für konstante Erregung.

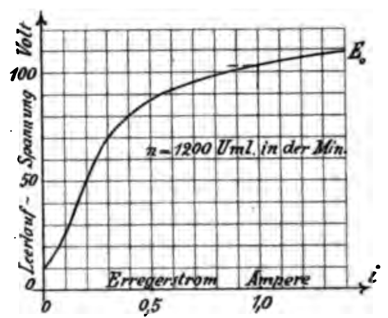


Fig. 244. Leerlaufcharakteristik für konstante Umlaufszahl.

für einen bestimmten Fall gezeichnete gerade Linie die Leerlaufcharakteristik für konstante Erregung. Die Proportionalität folgt aus dem Gesetz, daß die Induktionsspannung proportional zur Schnittgeschwindigkeit (vgl. § 70, A) ist. Die Schnittgeschwindigkeit $\mathfrak{B}$ wird erhalten aus der gesamten konstanten Kraftlinienzahl $\mathfrak{N}$ und der Zahl der Leiter, die ihn in der Sekunde schneiden (z'); so entsteht für die Leerlaufspannung bei konstanter Erregung der Ausdruck

$$E_{\text{Volt}} = 10^{-8} \cdot \mathfrak{B} = 10^{-8} \cdot \mathfrak{N} \cdot z';$$

liegen im ganzen z Leiter rundum auf dem Anker, so ist bei der Umlaufszahl / Sek. n' zu schreiben:

$$z' = z \cdot n'$$

und es wird daraus

$$E_{\text{Volt}} = 10^{-8} \cdot \mathfrak{N} \cdot z \cdot n';$$

diese Spannung wird zwar an zwei Stellen erzeugt, nämlich unter jedem Pol einmal, beide Spannungen sind aber für den Außenkreis parallelgeschaltet, die Spannung tritt daher zwischen den Bürsten nur in ihrem einfachen Werte auf.

Auf Grund derselben Gleichung sind die Verhältnisse zu durchschauen für den zweiten Fall der Leerlaufcharakteristik, der für kon-

stante Umgangszahl und veränderliche Erregung gilt, und für den ein Beispiel die Fig. 244 gibt. Die Spannung wird, da außer z nun n konstant ist, proportional zu dem gesamten Kraftfluß $\mathfrak{N}$; wird also die Erregerstromstärke i nach der wagerechten Achse und die Leerlaufspannung E_0 nach der senkrechten Achse aufgetragen, so entsteht eine Kurve mit der dem Eisen charakteristischen Krümmung (vgl. Fig. 244 mit Fig. 215). Die Krümmung tritt infolge des Luftraumes nicht ganz so deutlich hervor, wie bei einem nur durch Eisen verlaufenden Kraftfluß. Die Abnahme dieser zweiten Leerlaufcharakteristik nach Fig. 244 hat die große Bedeutung, daß dadurch zunächst fürs Auge Aufschluß über die Höhe der magnetischen Beanspruchung des Eisens und des Verhältnisses von Eisen- und Luftwiderstand erhalten wird, indem man nach der Art der Krümmung urteilt. Auch rechnerisch läßt sich diese Kurve verwerten, indem man die Gesamtzahl der Einheitslinien $\mathfrak{N}$ für jeden Fall nach dem Ausdruck

$$\mathfrak{N} = \frac{E_{0\,\mathrm{Volt}}}{z \cdot n} \cdot 10^8$$

bestimmt.

Bei dem Erregerstrome $i = 0$ ist eine Spannung vorhanden, die auf dem remanenten Magnetismus des Gestelles beruht, und die bei modernen Maschinen (Stahlguß) etwa 0,1 der normalen Spannung beträgt. Ihre Höhe ist im wesentlichen abhängig von dem verwendeten Material des Gestelles.

Beide Schaulinien Figg. 243 und 244 zusammen zeigen, daß zur Änderung der Spannung eine Änderung der Umlaufszahl in wirksamer Weise zum Ziele führt, während eine wesentliche Erhöhung des Erregerstromes bei starker Sättigung nur eine geringe Spannungserhöhung bringt.

Eine Maschine mit Fremderregung betrieben gestattet für den Fall, daß die Auflagestelle der Bürsten gänzlich unbekannt ist, eine bequeme Methode, diese Stelle zu finden, indem man bei abgehobenen Bürsten zwei zu einem Spannungsmesser führende Drähte diametral gegenüber auf dem Kollektor schleifen läßt (von Hand gehalten) und die Stelle sucht, bei der der Spannungsmesser die größte Voltzahl anzeigt. Auf diese Stelle können die Bürsten gelegt werden, an anderen Stellen würde so starkes Feuern auftreten können, daß Kollektor und Bürsten ihre Politur verlieren.

Besteht die Magnetwicklung einer Maschine aus vielen dünnen Drähten, so muß sie nach dem Schema Fig. 203 angeschlossen sein, um die schädlichen Einflüsse der Selbstinduktionsspannung beim Unterbrechen (vgl. § 67, 11. Versuch) zu vermeiden.

§ 81. Die Selbsterregung; Hauptschluß-, Nebenschluß- und Doppelschlußmaschine.

Benutzt man die durch remanenten Magnetismus erzeugte Ankerspannung (vgl. § 80) dazu, mit ihr einen Strom durch die Magnet-

wicklung in dem Sinne zu schicken, daß der Magnetismus dadurch verstärkt wird, so erhöht sich mit der Vermehrung der Kraftlinien zugleich die Ankerspannung. Die erhöhte Ankerspannung verstärkt den Magnetisierungsstrom, und es tritt eine weitere Steigerung des Kraftflusses und der Ankerspannung ein. Die Steigerung setzt sich fort, bis zu einem durch die Umlaufszahl des Ankers bestimmten Punkt; ist der erreicht, so heißt die Maschine gesättigt. Der Vorgang der Steigerung heißt die Selbsterregung. Mit ihr ist es möglich, ohne fremde Stromquelle unmittelbar mechanische Leistung in elektrische umzuwandeln. Die Entdeckung der Möglichkeit einer Selbsterregung und ihre erste Anwendung fand durch Werner von Siemens [Hist. 46] statt.

A. Die Hauptschlußmaschine.

Sind der Anker, die Magnetwicklung und der Außenkreis hintereinandergeschaltet,* so kommt man zur Hauptschlußmaschine (Reihenschluß- oder Serienmaschine). Das Schema dieser Schaltung zeigt Fig. 245, in der A den Anker, M die Magnetwicklung und der übrige Teil des Kreises die Stromverbraucher bezeichnet. Der innere Widerstand technischer Stromquellen wird gering gehalten. Hier setzt sich der innere Widerstand aus demjenigen des Ankers (w_a) und der Magnetwicklung (w_m) zusammen. Daher besitzt sowohl der Anker wie auch die Magnetwicklung dicke Kupferdrähte. Mit geringer Zahl von Magnetwindungen läßt sich, da ein beträchtlicher Strom durch die Feldspulen fließt, die nötige Amperewindungszahl herstellen. An jeder Stelle des in Fig. 245 dargestellten Stromkreises ist infolge der Reihenschaltung die Stromstärke gleich. Wird wenig Strom gebraucht, so ist daher die Maschine schwach erregt und zeigt geringe Spannung. Bei größer werdender Belastung nimmt auch der Kraftfluß und die mit ihm erzeugte Spannung zu. Bei konstanter Umlaufszahl muß nach den bisherigen Erörterungen die in dem Anker erzeugte Spannung (die EMK) mit steigendem Strome in dem gleichen Maße zunehmen wie der Kraftfluß, also gilt für ein Beispiel etwas Ähnliches, wie durch Fig. 244 ausgedrückt ist, nur für normale Fälle mit größeren Amperezahlen an der wagerechten Achse. Von der im Anker erzeugten Spannung wird ein Teil bei Stromlieferung dazu benutzt, die inneren Widerstände zu überwinden. Heißt die Stromstärke I, so beträgt der innere Spannungsverlust

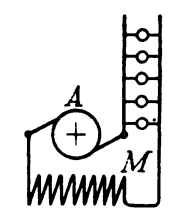


Fig. 245. Schema der Hauptschlußmaschine.

$$e = I(w_a + w_m);$$

wird für diesen Fall eine Spannung E im Anker erzeugt, so tritt an den Klemmen die Spannung auf:

$$E' = E - I(w_a + w_m);$$

diese Gleichung der Hauptschlußmaschine lehrt, daß ein mit I pro-

* Ältere Bezeichnung: die Teile liegen im Hauptschluß.

portionaler Wert von der EMK abzuziehen ist, damit die Klemmenspannung erhalten wird. Unter Berücksichtigung des geringen Anstieges der EMK bei stärkerer Magnetisierung folgt, daß die Klemmenspannung bei höheren Amperezahlen nach dem anfänglichen Anstieg wieder abnimmt. Wird die Klemmenspannung E', die Stromstärke I und der Widerstand der Maschine $(w_a + w_m)$ gemessen, so kann aus obiger Gleichung die EMK gerechnet werden zu

$$E = E' + I(w_a + w_m);$$

für den Fall konstanter Umlaufszahl stellt Fig. 246 ein Beispiel für das Verhalten einer Hauptschlußmaschine dar. Die Kurve der E' heißt die äußere, die Kurve der E die innere Charakteristik der Maschine. Die gerissen gezeichnete Gerade deutet die Werte für e an. die auf E' aufgesetzt werden.

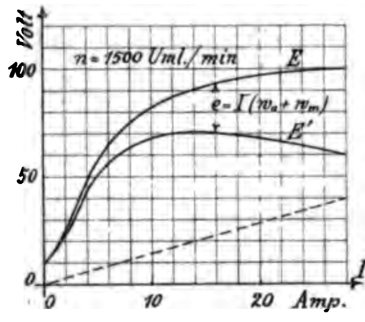


Fig. 246. Charakteristik einer Hauptschlußmaschine.

Die Betrachtung lehrt, daß die Hauptschlußmaschine für die üblichen elektrischen Anlagen, bei denen die Spannung konstant gehalten und alle Stromverbraucher parallel geschaltet werden, keine Bedeutung haben kann. Sie hatte früher vor der Einführung des Dreiphasenstromes eine Bedeutung für Einzelkraftübertragungen. Eine Eigenschaft gibt der Hauptschlußmaschine für besondere Fälle ein Dasein: Arbeitet sie in direkter Kupplung mit einer Kolbenmaschine konstanter Admission auf einen veränderlichen elektrischen Widerstand, so führt sie in allen Fällen die gleiche Stromstärke, nämlich diejenige, bei der das Gegendrehmoment vom Strome her gleich ist dem von der Antriebsmaschine abgegebenen Drehmomente. Dabei stellt sie ihre Umlaufszahl proportional zum Widerstand des Kreises ein; die erzeugte Spannung wird also dem gerade eingeschalteten Widerstande proportional. Das Aggregat läßt sich mit Vorteil anwenden, wo zugeschaltete Teile in den einen Stromkreis eingefügt werden, also wo an Stelle des Prinzipes der Parallelschaltung die Hintereinanderschaltung gewählt wird.

B. Die Nebenschlußmaschine.

Die Nebenschlußmaschine entsteht dadurch, daß sowohl die Magnetwicklung als auch der Belastungsstromkreis an die Ankerklemmen gelegt wird, wofür Fig. 247 zunächst das Schema gibt. Es ist darin wiederum der Anker mit A, die Magnetwicklung mit M bezeichnet. Der Innenkreis besteht nur aus dem Ankerkreise; Magnetwicklung und Belastung sind parallelgeschaltet oder, was dasselbe bedeutet, sie liegen zueinander im Nebenschluß. Das Schema läßt die erforderlichen äußeren Unterschiede gegen die Hauptschlußmaschine und das Verhalten erkennen:

An der Magnetwicklung liegt die ganze erzeugte Spannung; wenn die von der Magnetwicklung verbrauchte Leistung klein sein soll, so muß ihre Stromstärke gering, der Widerstand der Magnetwicklung also groß sein; das verträgt sich mit der Anforderung, daß zum Erreichen einer genügenden Amperewindungszahl bei dem schwachen Erregerstrome die Zahl der Windungen der Magnetspulen groß sein muß; die Magnetspulen der Nebenschlußmaschinen enthalten also viele Windungen eines dünnen Kupferdrahtes. An der Nebenschlußmaschine besitzt nur die Ankerwicklung dicke Kupferdrähte. Im Verhalten fällt schon durch das Schema Fig. 247 auf, daß die Maschine sich erregen kann, auch wenn der Nutzstromkreis unterbrochen ist, denn Anker und Magnetwicklung können unabhängig vom Belastungskreise einen geschlossenen Kreis bilden. Weiterhin gibt über das Verhalten der Nebenschlußmaschine folgende Betrachtung Aufschluß:

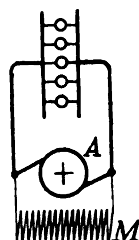


Fig. 247. Schema der Nebenschlußmaschine.

1. Wie weit erregt sich die Maschine bei unterbrochenem Nutzkreise? Diese Frage beantwortet die Leerlaufcharakteristik in Verbindung mit einer Geraden, welche die an den Klemmen der Magnetwicklung nach dem Ohmschen Gesetz erforderlichen Werte der Spannung in Abhängigkeit vom Erregerstrome darstellt. Für ein Beispiel zeigt das Fig. 248.

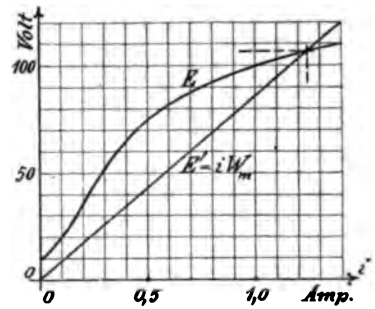


Fig. 248. Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom.

Es bedeutet darin i den Erregerstrom, E die im Anker erzeugte Spannung und E' die Werte $i \cdot W_m$, wobei W_m der Widerstand der Magnetwicklung sei. Infolge der durch das Eisen hervorgebrachten charakteristischen Krümmung von E liegt ein Teil dieser Kurve über der Geraden E', ein weiterer Teil darunter. Im unerregten Zustande ist E, herrührend vom remanenten Magnetismus, höher als E', welches vom Nullpunkt ausgeht. Also der Anker erzeugt zunächst stets höhere Werte von E bei einem bestimmten i, als für dieses i an den Klemmen der Magnetwicklung aufzutreten brauchen. So lange das erfüllt ist, steigt die Erregung. An derjenigen Stelle aber, wo die Gerade E' die Kurve E schneidet, macht die Erregung halt, denn von nun ab müßten höhere Werte zur Steigerung des Kraftflusses an den Klemmen von W liegen, als der Anker erzeugen kann. Es ist selbstverständlich, daß diese Betrachtung für eine konstante Umlaufszahl des Ankers gilt, und daß die gekrümmte Linie und ihr Schnittpunkt mit der festen Geraden durch Verringerung der

Umlaufszahl nach unten, durch Erhöhung der Umlaufszahl nach oben gerückt wird.

2. Welches ist das Verhalten der Nebenschlußmaschine in der Belastung?

Es tritt dadurch, daß der Anker Strom führt (bei unterbrochenem Nutzkreise nur den Erregerstrom), ein von der EMK des Ankers abzuziehender Wert einer Ankerverlustspannung auf. Führt der Nutzkreis den Strom I, so fließt im Anker der Strom $I + i$, und die Ankerverlustspannung beträgt

$$e = (I + i) \cdot w_a,$$

worin w_a den Ankerwiderstand bedeutet. Heiße E die EMK und E' die Klemmenspannung des Ankers, so entsteht die Gleichung der Nebenschlußmaschine:

$$E' = E - (I + i) \cdot w_a;$$

dieses E' ist zugleich die Spannung am Erregerkreise, und es steht hiermit fest, daß der Erregerstrom und dadurch auch die EMK der Maschine bei der Belastung zurückgehen muß. Nach welchem Verlauf

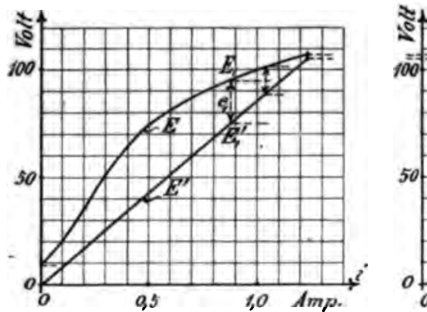


Fig. 249 a. Hilfskonstruktion.

Fig. 249 b. Charakteristik einer Nebenschlußmaschine.

das geschieht, zeigt für ein Beispiel ein Blick auf die beiden Schaulinien der Fig. 249a und b:

Die Kurve links zeigt die EMK der Maschine in Abhängigkeit vom Erregerstrom und die dazu gezeichnete Gerade, die Spannung am Erregerkreise (= Klemmenspannung der Maschine). Die kleine Senkrechte, durch die ein Schneiden beider Linien nicht zustandekommt, ist der Spannungsverlust im Anker, herbeigeführt nur durch den Erregerstrom. Die Kurven rechts zeigen die Belastungscharakteristik der Nebenschlußmaschine, und zwar E die innere, E' die äußere Charakteristik in Abhängigkeit vom Ankerstrome $(I + i)$. So viel, als sich die Kurve der EMK des Ankers in Fig. 249a über die Gerade E' erhebt, so viel darf und kann im Anker für den Wert e verwendet werden; und aus diesem Wert

$$e = (I + i)\, w_a$$

bestimmt sich für jeden einzelnen Fall (in der Figur ein Beispiel mit dem Index 1 eingetragen) in dem Diagramm rechts (Fig. 249b) diejenige Stelle, an die die betreffenden Werte der EMK und der Klemmenspannung gehören. Dazu wird eine durch den Nullpunkt gehende, den Werten e entsprechende Gerade in das Koordinatensystem der rechten Seite eingetragen (in der Figur gerissen gezeichnet); man nimmt den betreffenden Wert e nach Maßgabe des linken Diagrammes in den Zirkel und findet das zu dem Fall gehörige $(I + i)$ an der Stelle, wo sich dasselbe e an der rechten Seite wiederfindet. Die durch Fig. 249b mit E' ausgedrückte Charakteristik läßt sich an der Maschine abnehmen, indem man nach Fig. 247 schaltet, die Umlaufszahl konstant hält und im Nutzkreise den Widerstand vom Werte ∞ zu immer geringeren Werten verändert. Zu messen ist bei den Versuchen I, i und E'; der Ankerwiderstand ist vorher oder nachher zu bestimmen.

Trägt man die gewonnenen Werte nach Art der Fig. 249b in ein Achsenkreuz ein, so können die Werte e auf die Werte E' gesetzt werden und man erhält die Kurve der EMK, die den Ausdruck befolgt

$$E = E' + (I + i) \cdot w_a .$$

Der Teil der Charakteristik in der Nähe des Umkehrpunktes und hinter dem Umkehrpunkt hat praktisch keine Bedeutung. Der untere Ast kann durch Versuch gefunden werden, indem man die Klemmen bei stillstehender Maschine durch einen Kurbelwiderstand kurz schließt und dann die Maschine laufen läßt. Eine Vergrößerung der Ohmzahl führt nun zu steigenden Werten von Spannung und Strom.

Als Zusammenfassung des Verhaltens der Maschine kann gesagt werden: Die unbelastete Maschine hat die höchste Spannung. Bleibt die Umlaufszahl konstant, so fällt mit wachsender Belastung die Spannung wegen des Spannungsabfalles im Anker und der dadurch hervorgebrachten Verringerung der Kraftlinien. Die Spannung fällt bei den Maschinen der Praxis im Gebrauchsbereich etwa um 20 bis 30 % der Ausgangsspannung, während bei Überlastungen ein stärkerer Spannungsrückgang eintreten kann, und zwar derart, daß die Maschine im Grenzfall (Kurzschluß) sich gänzlich (bis auf den remanenten Wert des Gestelles) entmagnetisiert. Der Grund dafür kann kurz so ausgedrückt werden: Der Außenkreis entzieht infolge seines geringen Widerstandes dem Nebenschluß den Strom.

Mit Verringerung der Stromstärke im Gebrauchsbereich der Maschine steigt die Spannung um ähnliche Beträge, wie sie bei Stromvermehrung als Rückgang auftreten.

3. Nach obigen Erörterungen wird erkannt, daß die Nebenschlußmaschine für normale Zentralanlagen, die konstante Netzspannung und veränderlichen Strom, je nach Bedarf, erzeugen, nach dem Schema Fig. 247 beinahe die gestellten Anforderungen erfüllt. Für völlige Konstanthaltung der Spannung innerhalb einer oberen und unteren

Grenze mit höchstens 2 % zulässiger Schwankung kommt nur noch ein regelbarer Widerstand hinzu, der in den Erregerkreis geschaltet und in dem Schema Fig. 250 mit R bezeichnet ist. Soll eine Maschine für bestimmte Netzspannung geeignet sein, so muß sie diese Netzspannung bei dem höchsten vorkommenden Strome halten können. Sie würde bei geringerem Strome im Nutzkreise höhere Voltzahlen aufweisen, falls ihr Nebenschlußwiderstand denselben Wert beibehielte. Die Netzspannung kann jedoch wiederhergestellt werden, indem ein geeigneter Teil des Widerstandes R in den Nebenschlußkreis zugeschaltet wird. Durch Veränderung von R verändert sich die Neigung der in Fig. 249a mit E' bezeichneten Geraden. Man erhält für eine Reihe verschiedener Nebenschlußwiderstände eine ganze Schar von Charakteristiken, deren jede nur auf einem kurzen Stück benutzt wird. Der Widerstand R heißt der Regler (Regulator) der Maschine; er wird bei

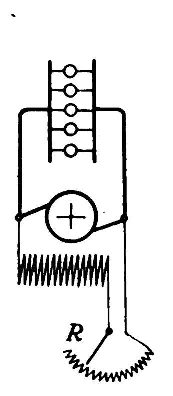


Fig. 250. Nebenschlußschaltung mit Regler.

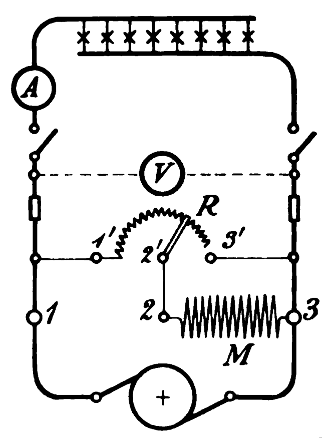


Fig. 251. Betriebsschema einer Anlage mit Nebenschlußmaschine.

steigender Belastung jedesmal dann eingestellt, wenn die Spannung ihren zulässigen Geringstwert erreicht hat, und zwar auf einen Kontakt, bei dem nach der Neueinstellung der zulässige Höchstwert vorhanden ist; bei abnehmender Belastung reguliert man, falls der Höchstwert erreicht ist, auf den zulässigen Geringstwert der Netzspannung ein. Durch diese Anforderung ergibt sich eine bestimmte Abstufung des Nebenschlußreglers für eine bestimmte Maschine, eine bestimmte Netzspannung und für bestimmte Umlaufszahl.

Mit Rücksicht auf funkenlose Abschaltung des Nebenschlusses (vgl. § 67, 11. Versuch) und mit Rücksicht auf Instrumente, Sicherungen und Ausschalter entsteht in praktischen Fällen aus Fig. 250 das Schema Fig. 251.

Außer den bisher gebrauchten Bezeichnungen gelten hierin:

A = Strommesser,
V = Spannungsmesser,

1, 2, 3 = Klemmen der Nebenschlußmaschine
(1 = freie Ankerklemme),
(2 = freie Spulenklemme),
(3 = gemeinsame Klemme für Anker und Spule),
1', 2', 3' = Klemmen des Regulators
(1' = Spiralenklemme),
(2' = Kurbelklemme),
(3' = Klemme für den Knopf der funkenlosen Abschaltung).

Damit vom Strome Null bis zum Höchstwert des Stromes möglichst wenig Stufen des Nebenschlußreglers erforderlich werden, also weniger oft geregelt zu werden braucht, ist man bestrebt Maschinen mit wenig abfallender, d. h. gestreckter Charakteristik zu bauen.

Die Verwendung von Nebenschlußmaschine mit Regler bildet den normalen Fall der Stromerzeugungsanlage der Gleichstromzentralen.

C. Die Doppelschlußmaschine.

Ein Blick auf die Charakteristik der beiden bisherigen Maschinen (Figg. 246 und 249b) lehrt, daß von der Stromlosigkeit im Nutzkreise aus die Spannung der Nebenschlußmaschine mit steigender Belastung sinkt, während die Spannung der Hauptschlußmaschine steigt. Es läßt sich erreichen, daß eine Nebenschlußmaschine mit einer geringen Anzahl von Hauptschlußwindungen in dem Maße versehen wird, daß die Konstanthaltung der Klemmenspannung für alle praktisch vorkommenden Belastungen mit genügender Annäherung erfüllt ist. Nebenschluß- und Hauptschlußwindungen müssen daher in demselben Sinne wirken, was zunächst durch Fig. 252, in der nur die vorn liegenden Windungen gezeichnet sind, zum Ausdruck gebracht sein soll.

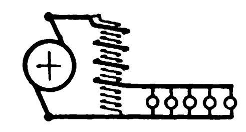


Fig. 252. Schema der Doppelschlußmaschine.

Auf diese Weise entsteht die Doppelschluß- (Compound- oder Verbund-)Maschine.

Die Bestimmung der Zahl der Hauptschlußwindungen erfolgt durch einen Versuch, indem man die mit Regler versehene Nebenschlußmaschine belastet und unter Konstanthaltung der Umlaufszahl und Spannung den Strom im Haupt- und Nebenschlusse beobachtet. Durch Multiplikation des Nebenschlußstromes mit der Zahl der Nebenschluß-Magnetwindungen erhält man die jedesmal erforderlichen Amperewindungen. Von dem jedesmaligen so gewonnenen Wert zieht man die Amperewindungen des Leerlaufes ab und erhält dadurch ungefähr zum Hauptstrom proportionale zusätzliche Amperewindungszahlen. Dividiert man jeden dieser Reste durch den zugehörigen Hauptstrom, so bekommt man eine Reihe ungefähr gleich großer Zahlen, deren Mittel als Windungszahl des Hauptschlusses zu nehmen ist.

Von Wichtigkeit ist die Schaltung der Maschine: Zweigt der Nebenschluß nach dem Schema Fig. 253 direkt am Anker ab, so ent-

steht der kurze Nebenschluß, und eine Maschine dieser Schaltung befolgt mit den bisherigen Bezeichnungen (w_m = Widerstand der Hauptschlußwicklung) die Gleichung:

$$E = E' + I \cdot w_m + (I + i) \cdot w_a .$$

Der lange Nebenschluß zweigt nach Fig. 254 hinter den Hauptschlußwindungen ab, und eine Maschine dieser Schaltung unterliegt dem Ausdruck:

$$E = E' + (I + i)(w_a + w_m);$$

beide Schaltungen ergeben im Verhalten charakteristische Unterschiede. Das Verhalten kann nach den bei der Nebenschlußmaschine gegebenen Grundsätzen aus der Leerlaufcharakteristik ermittelt werden.

Doppelschlußmaschinen sind nicht so weit verbreitet, als man nach dem Erfolg einer selbsttätig konstant gehaltenen Klemmenspannung

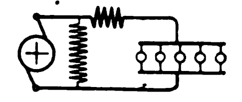


Fig. 253. Kurzer Nebenschluß.

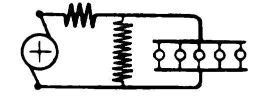


Fig. 254. Langer Nebenschluß.

erwarten sollte. Sie haben in Verbindung mit Akkumulatoren, um derentwillen man meistens bei Beleuchtungsanlagen zum Gleichstrom greift, unbequeme Eigenschaften, die sie für diesen Fall praktisch ganz ausschließen. Wo Doppelschlußmaschinen vorkommen, verwendet man sie ebenfalls mit Regler im Nebenschlusse.

§ 82. Erweiterungen.

A. Das Feuern in einfachster Darstellung.

Die Forderung eines funkenfreien Ganges einer Maschine ist berechtigt durch die Zerstörung von Kollektor und Bürsten, die das Feuern mit sich bringt. Diejenige Ankerspule, die an einer Bürste vorbeiwandert, ist in sich kurzgeschlossen, so lange die Bürste (vgl. Fig. 255) auf den

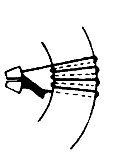


Fig. 255.

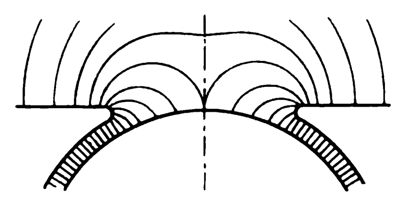


Fig. 256.

beiden zugehörigen Kollektorstäben aufliegt. Erfolgt dieses Kurzschließen, während an der Spule Kraftlinien ein oder austreten, so kommt infolge der Induktionsspannung in der kurzgeschlossenen Spule ein Strom zustande, der zwischen Kollektor und Bürste unterbrochen wird, dadurch Feuern erzeugt und auch infolge von Stromwärme in

den Ankerdrähten nur schadet. Zur Vermeidung hiervon würde zunächst die Anforderung aufgestellt werden können, daß die Bürsten nur da aufliegen sollen, wo Kraftlinien am Ankereisen weder ein- noch austreten (neutrale Stelle). Ganz ist diese Forderung nie erfüllbar, denn es treten stets Kraftlinien auf, die sich von den Polen aus über den Anker verbreiten. Für eine Maschine ohne Ankerstrom gilt etwa Fig. 256, an der zu sehen ist, daß die in Frage kommende Stelle auf jeder Seite in einem in der Symmetrieebene zwischen beiden Polen liegenden Punkt besteht, während eine Ankerspule einen Teil des Umfanges einnimmt.

B. Die Ankerrückwirkung.

Sobald ein Strom im Anker fließt, tritt von seinen Windungen aus eine magnetomotorische Kraft auf, die, wenn sie allein vorhanden wäre, einen magnetischen Kreis bilden würde, der im wesentlichen zwischen Ankereisen und Polschuhen im Sinne der in Fig. 257 gerissenen Linien auftreten würde. Sämtliche hier vorkommende Betrachtungen gelten für den Ring und für die Trommel. Das ursprünglich vorhandene, mit ausgezogenen Pfeilen im Luftraum in Fig. 257 angedeutete Feld setzt sich mit dem Ankerfelde zu einem resultierenden Felde zusammen. Aus der Richtung der Ankerkraftlinien in Fig. 257 ist ersichtlich, daß in dem gezeichneten Fall ein Nordpol unten und

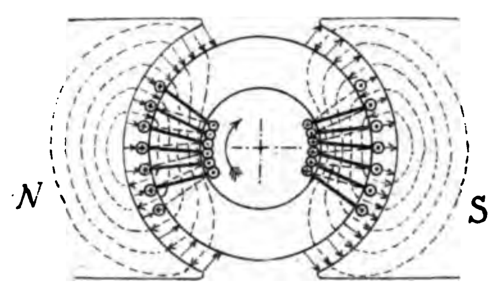


Fig. 257.

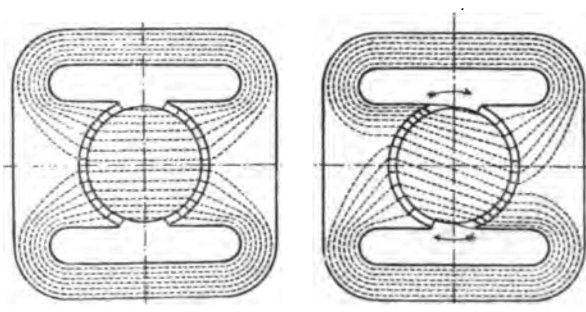


Fig. 258. Fig. 259.

ein Südpol oben am Ankereisen entsteht, daß also eine Quermagnetisierung gegenüber dem ursprünglich vorhandenen Felde durch den Ankerstrom auftritt. Das am stromführenden Anker auftretende, bei dem Umlauf zu überwindende Drehmoment kann ebensogut mit der Kraftwirkung zwischen den Feld- und Ankerpolen, als mit der Kraft-

wirkung zwischen Strom und Feld erklärt werden. Aus den Ankeramperewindungen und Feldamperewindungen zusammen resultiert gegenüber dem bei stromlosem Anker nach Fig. 258 gleichmäßig verteilten Kraftfluß nun ein solcher nach Art von Fig. 259, an der zu sehen ist, daß die Kraftlinien sich an der Polspitze zusammendrängen, wo die Ankerdrähte das Feld verlassen (Hinterhorn), während eine Schwächung des ursprünglichen Feldes vorhanden ist, wo die Ankerdrähte in den Kraftfluß eintreten (Vorderhorn). Die Feldschwächung am Vorderhorn und Feldverstärkung am Hinterhorn gilt für den Fall des Stromerzeugers stets, d. h. bei jeder Dreh- und Feldrichtung. Die hier skizzierte Erscheinung heißt die Ankerrückwirkung (Ankerreaktion). Sie hat zur Folge, daß der mittlere Weg des Kraftflusses bei zunehmender Strombelastung sich vergrößert, und daß das Material der Pole und der Luftraum bei gleichbleibendem Gesamtkraftfluß mit größerer magnetischer Dichte durchsetzt wird dadurch, daß sich der wesentliche Teil des Kraftflusses auf einen engeren Raum zusammendrängt. Mit der gleichen Amperewindungszahl auf den Feldspulen erhält man durch diese Vermehrung des magnetischen Widerstandes eine geringere Anzahl von Kraftlinien bei stromführendem Anker gegenüber dem stromlosen. Zum Erreichen eines bestimmten Kraftflusses ist daher bei der belasteten Maschine eine größere Amperewindungszahl durch die Feldspulen aufzubringen als bei der unbelasteten. Eine mit dem veränderten Verlauf des Kraftflusses zusammenhängende Folge ist die Verschiebung der neutralen Stelle, des Ankers, d. h. derjenigen Stelle, zu der die Bürstenauflagestelle vorderhand* gehört. Aus Fig. 256 wird bei stromführendem Anker nun die Fig. 260: Die Bürsten müssen bei stromführender Maschine ein Stück im Sinne des Umlaufes verschoben werden, entsprechend dem im Fig. 260 angegebenen Winkel α.

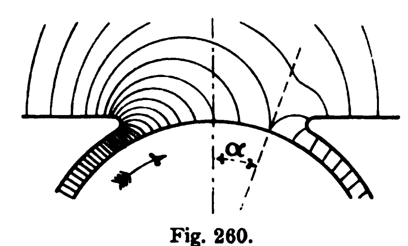


Fig. 260.

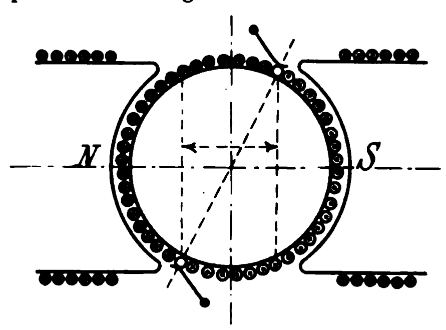


Fig. 261. Entmagnetisierende Wirkung des Ankers.

Diese Verschiebung der Bürsten hat entsprechend der Andeutung von Fig. 261 einen weiteren Nachteil zur Folge, indem die zwischen den beiden senkrechten gerissen eingezeichneten Linien befindlichen Ankerampere-

* Vgl. unter F dieses Paragraphen.

windungen in entmagnetisierendem Sinne gegenüber den Feldamperewindungen wirken. Auch diese Erscheinung trägt zu der Notwendigkeit einer Erhöhung der Feldamperewindungen bei belasteter Maschine bei.

C. Die Beziehung zwischen Leerlaufs- und Belastungscharakteristik.

Die Ankerrückwirkung veranlaßt ein nochmaliges Zurückkommen auf Fig. 246 und Fig. 249a und b.

Nimmt man die äußere Charakteristik der Hauptschlußmaschine in der unter § 81A angegebenen Weise ab, und trägt man die Verlustspannungen e auf die Werte E', so erhält man elektromotorische Kräfte E, die niedriger liegen als die Leerlaufspannungen, die man bei dem gleichen Strome I erhalten würde. Die Leerlaufspannungen E_0 liegen dann etwa nach Maßgabe von Fig. 262 über E. Diese Erscheinung gibt durch Vergleich der Werte E_0 und E ein Maß des Kraftlinienrückganges durch Ankerreaktion.

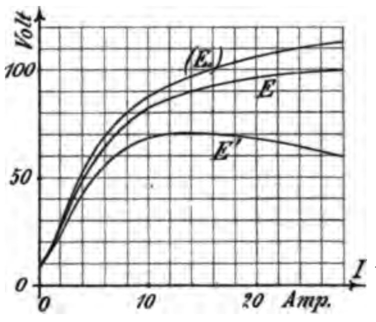


Fig. 262.

Für die Nebenschlußmaschine gestaltet sich das Entsprechende etwa nach Fig. 263a und b:

Der in Fig. 263a zwischen der Leerlaufcharakteristik E_0 und der geraden Linie E' liegende Teil wird zur Deckung zweier spannungsverkleinernder Erscheinungen verwendet, nämlich erstens zur Deckung des Spannungsrückganges von Ankerreaktion her, und zweitens zur Deckung der Verlustspannung durch Ankerwiderstand. Ein Konstruk-

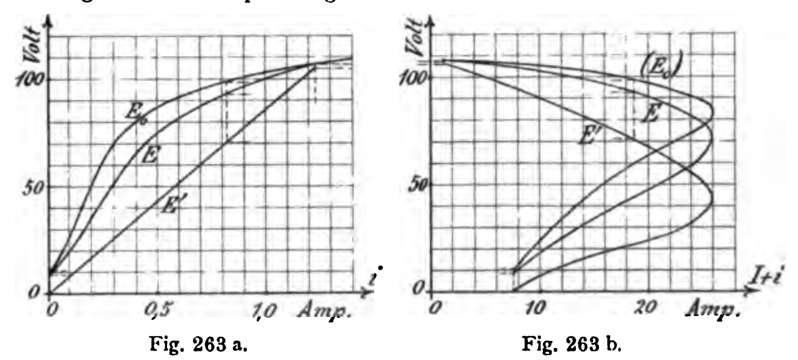


Fig. 263 a. Fig. 263 b.

tionsverfahren zur vorherigen Ermittlung einer Nebenchlußcharakteristik aus der Leerlaufskurve ist jedoch nicht möglich, solange nicht eine empirische Formel für den Spannungsrückgang durch Ankerreaktion verwendet wird. Hingegen läßt sich aus einer aufgenommenen äußeren Charakteristik und der Leerlaufskurve durch Einzeichnen von E in Fig. 263a oder b das Maß des Spannungsrückganges durch Ankerreaktion finden.

D. Einige Mittel zur Vermeidung einer Bürstenverstellung.

Die unbequemste Folge der Ankerrückwirkung ist die Notwendigkeit der Bürstenverstellung. Daher strebt die Technik danach, diesem Übelstand mit jedem möglichen Mittel zu steuern. Zunächst liegt der Gedanke nahe, dafür zu sorgen, daß die in Fig. 257 gerissen eingezeichneten Kraftlinien in möglichst geringem Maße auftreten. Das läßt sich nach den Gesetzen des magnetischen Kreises durch zwei Mittel erreichen, indem erstens der magnetische Widerstand des zu unterdrückenden magnetischen Kreises recht groß, zweitens die Ankeramperewindungen recht gering gehalten werden, wenn man sie nicht direkt kompensiert, worüber der spätere Absatz über Wendepole Aufschluß gibt. Wird der Luftraum zwischen Anker und Polschuh vergrößert, so vergrößert sich auch der magnetische Widerstand im Ankerfeldkreise; zugleich vergrößert sich aber auch der magnetische Widerstand im Kreise des Nutzkraftflusses; es sind daher zum Erreichen der gleichen Nutzlinienzahl mehr Amperewindungen auf den Feldspulen unterzubringen; die Ankeramperewindungen treten dadurch gegen die Feldamperewindungen relativ zurück. Die Rückwirkungsfrage wird also gebessert.

Ein wirksameres Mittel als die Einschaltung eines Luftraumes bildet die Einschaltung eines stark gesättigten, aus Eisen bestehenden magnetischen Kreises zwischen Ankereisen und Polschuh; das Eisen dieses Teiles, das von den Feldspulen her stark magnetisiert ist, erhält durch eine zusätzliche (vom Anker herrührende) Amperewindungszahl im positiven oder negativen Sinn nur eine geringe Kraftlinienänderung (vgl. die Kurven Fig. 215). Der Gedanke führt zu den Nuten- oder Zahnankern, die durch Fig. 264 erläutert sein sollen. Die Ankerbleche erhalten entlang ihres Umfanges Zähne in Form von Stegen, die durch Ausschneiden parallelseitiger Lücken stehen bleiben. Durch Aufeinanderlegen dieser Bleche bilden sich am Ankerumfang Kanäle, die mit Isolierstoff ausgefüttert werden, und in denen die Ankerdrähte unterzubringen sind. Die Ankerdrähte liegen dadurch nicht mehr unmittelbar im Felde, vielmehr nimmt der Kraftfluß zwischen den Drähten seinen Weg durch das

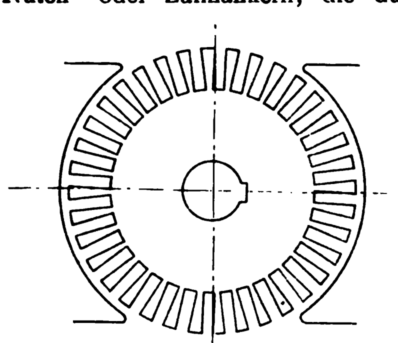


Fig. 264. Ankereisen mit Zähnen.

Eisen; die Drähte selbst liegen daher in einem bedeutend geringeren Felde, als wenn sie auf dem Ankerumfang eines glatten Ankers gleicher Kraftlinienzahl untergebracht wären. Diese Anordnung ändert nichts an der Induktionswirkung, denn nach dem Satz, daß die Änderung eines Kraftflusses im Inneren einer Windung ebenfalls eine Induktions-

wirkung hervorbringt, gerade als wenn die Windung in das Feld hinein bewegt worden wäre, bleibt in bezug auf die erzeugte Induktionsspannung alles beim alten. Weiteres über die Zahnanker folgt in einem besonderen Abschnitt.

Eine weitere Möglichkeit, die Ankerrückwirkung weniger störend hervortreten zu lassen, wird dadurch erhalten, daß die Polschuhe tiefe Einschnitte nach Art der Andeutung von Fig. 265 in Richtung des

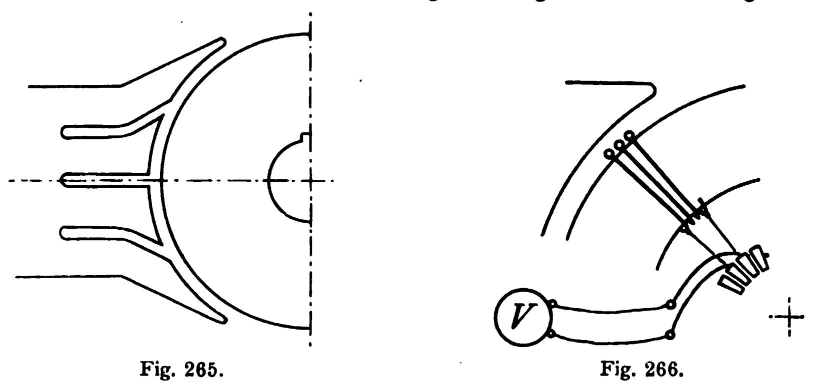


Fig. 265. Fig. 266.

von den Feldspulen erzeugten Kraftflusses erhalten, wodurch in den Kraftfluß der Ankerrückwirkung Lufträume eingeschaltet werden.

Vergrößert man den Abstand von der Spitze des einen zu der benachbarten Spitze des anderen Poles, so wirkt die durch Ankerreaktion hervorgerufene Feldverzerrung nicht in dem Maße bis auf die Mitte

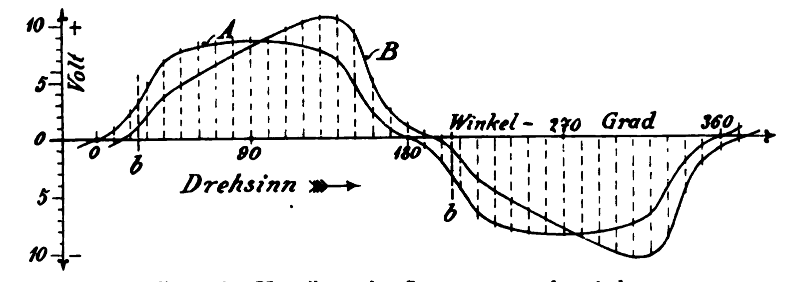


Fig. 267. Verteilung der Spannung um den Anker.

zwischen den Polspitzen, als wenn der Polspitzenabstand geringer wäre. Es wird daher auch dieses Mittel zur Unterdrückung der Bürstenverstellung beitragen.

Läßt man ein aus zwei Messingfedern in gegenseitigem Abstand einer Kollektorteilung bestehendes Hilfsbürstenpaar nach Angabe von Fig. 266 an verschiedenen Stellen einer in Betrieb befindlichen Maschine auf dem Kollektor schleifen, so erhält man durch Anlegung eines Spannungsmessers an die Hilfsbürsten die Spannung, die an den be-

treffenden Stellen innerhalb einer Spule erzeugt wird. Führt man diese Messung rund um den Kollektor einer unbelasteten Maschine mit zentrisch in der Polbohrung sitzendem Anker aus, so erhält man eine Spannungsverteilung nach Art der Kurve A von Fig. 267, in der die wagerechte Achse den abgewickelten Kollektor- oder Ankerumfang bedeutet. Die einzelnen Stellen sind nach Winkelgraden bezeichnet. Man erkennt daraus für A die symmetrische Anordnung. Die belastete Maschine hingegen zeigt entsprechend den Feldänderungen am Vorderhorn eine geringere, am Hinterhorn eine höhere Spannung zwischen den Hilfsbürsten, etwa nach Art der Kurve B in Fig. 267, die in diesem Verlauf mit höherer Erregerstromstärke erreicht wird, als im Falle A. Kurve B geht mit einer Verschiebung im Sinne der Drehung gegen A durch Null.*

Durch geeignete Form der Polschuhe lassen sich die für Leerlauf und Belastung auftretenden Spannungsverteilungskurven so umgestalten, daß ihre Neigungen nach verschiedenen Seiten gleich, aber im ganzen nicht mehr so empfindlich sind. Die Luftstrecke der Kraftlinien muß zu diesem Zweck am Vorderhorn geringer sein als am Hinterhorn. Die Maschine wird dadurch zwar nur für einen Drehsinn verwendbar, kann aber in bezug auf Bürstenverstellung günstiger arbeiten als die Maschine mit zentrisch zum Polbogen sitzendem Anker.

Bereits unter Berücksichtigung der in diesem Abschnitt aufgezählten Punkte gelangt die moderne Technik zu Maschinen, die von Nullast bis Vollast keine Bürstenverstellung brauchen. Es ist aber aus allen aufgezählten Punkten klar, daß die den funkenlosen Gang ohne Bürstenverstellung begünstigenden Mittel den Wirkungsgrad erniedrigen. Die moderne Technik hat sich im Interesse günstig laufender Maschinen daran gewöhnt, auf höhere erzielbare Wirkungsgrade zu verzichten; die Wirkungsgrade der elektrischen Maschinen fallen dabei auch unter Wahrung eines funkenfreien Ganges durchaus nicht niedrig gegen andere Teile der Anlage aus.

E. Zahnanker und Schablonenwicklung.

Bei Verwendung von Zahnankern stellen sich außer der Verminderung des Ankerfeldes noch einige Besserungen ein:

1. Falls man starke Leiter auf dem Umfang eines glatten Ankers anwendet, entstehen in ihnen an der Eintrittsstelle in das Feld und an der Austrittsstelle aus dem Felde Wirbelströme, deren schädlicher Einfluß in § 67, 10. Versuch klargestellt ist. Bei glatten Ankern vermeidet man an Maschinen hoher Stromstärken die Wirbelströme, indem an Stelle eines Kupferleiters mehrere Kupferleiter parallel gewickelt werden, wodurch das Material verteuert und der Raum der Wicklung schlechter ausgenutzt wird. Bei Zahnankern liegen die Leiter in den Nuten in schwachem Felde, die Wirbelströme treten daher zurück, und man kann massive Stäbe anwenden.

* Der Oszillograph von Siemens & Halske zeigt die nach dem beschriebenen Verfahren zu ermittelnden Kurven direkt.

2. Bei Nutenankern sind die Ankerdrähte besser gelagert als bei glatten Ankern. Bei offenen Nuten nach Fig. 264 liegen sie nach 3 Seiten geschützt in der Nut eingebettet, während die äußere Seite keinen Schutz hat. In diesem Falle sind Bänder gegen ein Herausschleudern der Ankerdrähte durch Fliehkraft anzuwenden. Hingegen ist durch die Nuten auch in dieser Form ein Vorteil vorhanden: Bei glatten Ankern liegen die Drähte unmittelbar im Felde, und die mechanischen zwischen Strom und Feld bei belasteter Maschine (nach § 67, 9. Versuch) auftretenden Kräfte greifen in tangentialer Richtung unmittelbar an den Drähten an, wodurch sich allmählich eine Lockerung der Drähte einstellt. Bei Nutenankern greift diese Kraft in Form eines magnetischen Zuges direkt an dem Eisen des Ankers am Zahnkopf an. Aber auch in Hinsicht auf Fliehkräfte gestatten Zahnanker eine bessere Lagerung der Ankerdrähte durch Anwendnng überdeckter Nuten. Man versteht darunter Anordnungen nach Figg. 268 und 269. Der Zahnkopf ist außen erweitert derart, daß ein Holzkeil über die eingebrachte Wicklung geschoben werden kann.

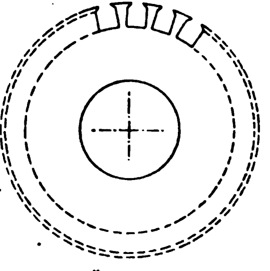


Fig. 268. Überdeckte Nuten.

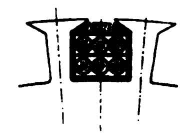


Fig. 269. Lagerung der Ankerdrähte in überdeckten Nuten.

3. Die Nuten geben dem Anker eine für das Aufbringen der Wicklung willkommene Teilung. Die Wicklung der Nutenanker kann unter Benutzung der durch die Nuten gegebenen Teilung (etwa auf die Nut eine Ankerspule) nach dem bisher für Ring und Trommel gegebenen Verfahren erfolgen. Einen größeren Vorteil bietet hingegen bei Trommeln die Schablonenwicklung, die zwar ohne Nuten auch in Frage kommen kann, meistens aber zusammen mit Nutenankern Verwendung findet. Folgendes ist darunter zu verstehen: Fig. 270 ist schematisch die Weiterbildung der Fig. 227 für den Fall eines Nutenankers. Dabei ist an Stelle jeder gerissenen Linie der Fig. 227 eine Spule getreten, wie auch in Schema Fig. 231, nur mit dem Unterschied, daß jede Spule in diesem Fall mit einer Schablone fertiggestellt und mit Isolierband bewickelt wird, ehe sie auf

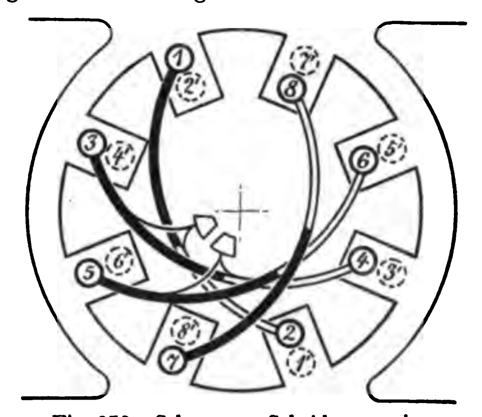


Fig. 270. Schema zu Schablonenspulen.

den Anker gelegt wird. Gibt man den Spulen geeignete Form, so legen sie sich schuppenförmig übereinander, und nur zum Schluß ist es erforderlich, die bereits in den Nuten in oberster Schicht liegenden Spulen herauszuklappen (bei 1, 3, 5 und 7 in Fig. 270), um die darunter gehörenden hineinzubringen.

Die zum Vermeiden eines Zwängens der Wicklung an den Stirnseiten meistens verwendeten räumlichen Anordnungen der Schablonenspulen sind durch Figg. 271 und 272 angedeutet.

Die Anordnung Fig. 271 beruht auf dem Satz, daß gleichgerichtete Evolventen desselben Grundkreises überall gleichen Abstand voneinander haben. Die Stirnverbindungsdrähte sind in zwei in Achsen-

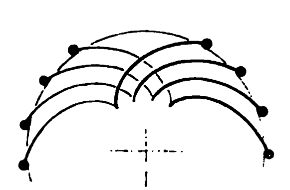


Fig. 271.
Stirnwicklung (Eickemeyer).



Fig. 272. Mantelwicklung.

richtung ein Stück verschobenen Evolventenscharen angeordnet. Der Übergang jeder Spule von der äußeren (nach rechts verlaufenden und zur oberen Drahtschicht der Nut gehörenden) zur inneren (nach links verlaufenden und zur inneren Drahtschicht der Nut gehörenden) Evolvente erfolgt durch einen kurzen Verlauf der Drähte in Achsenrichtung nahe der Mitte der Stirnverbindung. Die vorn liegenden Teile der Verbindungsdrähte sind in Figg. 270 und 271 stark ausgezogen.

Fig. 272 benutzt an Stelle der zwei Evolventenscharen zwei Scharen von Schraubenlinien; die eine Schar liegt auf einem äußeren, die andere auf einem inneren Zylindermantel, deren Durchmesser unmittelbar durch die Lage der Ankerdrähte in den Nuten gegeben wird.

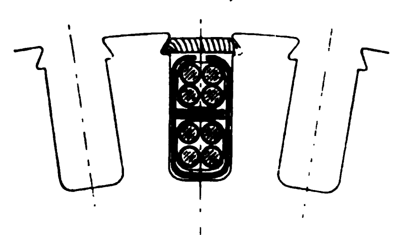


Fig. 273. Offene Nuten mit Holzkeil.

Die einzelnen Verbindungsdrähte von Spule zu Spule zugleich mit dem Anschluß an den Kollektor werden nach den Grundsätzen der Fig. 227 entsprechend den in dieser Figur ausgezogenen Linien gelegt, wofür Fig. 270 mit 2 Kollektorstäben die Andeutung gibt.

Stützscheiben und Bänder sichern die Lage der Stirnverbindungen. Bei Zahnankern mit Schablonenwicklung werden entsprechend der Fig. 269 die Bänder der Ankerdrähte vermieden durch eine Konstruktion nach Art von Fig. 273.

Trommeln mit Schablonenwicklungen vereinigen die früher genannten Vorzüge des Ringes und der Trommel: Übersichtlichkeit und leichte Ausbesserungsfähigkeit der Wicklung, Ausnutzung des Ankerdurchmessers und geringe Länge der Verbindungsdrähte gegen die Länge des wirksamen Ankerdrahtes. Sie vermeiden die Nachteile, die bei den älteren Anordnungen sowohl für Ring als auch für Trommel angegeben worden waren. Die Folge hiervon ist, daß gegenwärtig fast nur noch Schablonentrommeln gebaut werden.

F. Weitergehende Andeutungen in bezug auf die Stromwendung.

Gleiten Kollektorstäbe unter einer Bürste hinweg, so treten in bezug auf die zugehörigen Spulen folgende für den Gang der Maschine wichtige Erscheinungen auf:

1. Wenn allein die unter A dieses Paragraphen gekennzeichnete Induktion aufträte, so würde gelten:

a) für den Fall, daß die Bürstenmitte auf der neutralen Stelle steht (vgl. Fig. 274): Der unter der Bürstenmitte befindliche Kollektorstab besitzt die höchste Spannung gegen den anderen Pol der Maschine. Die unter den Bürstenkanten liegenden Kollektorstäbe sind in bezug auf ihre Spannung diesem entgegengesetzten Pole bereits eine Stufe näher gerückt. Unter der Plusbürste ist der mittlere Stab positiv gegen die beiderseitig benachbarten; unter der Minusbürste ist der mittlere Stab negativ gegen die beiderseitig benachbarten. Der Gedanke ist für die positive Bürste in Fig. 274 durch die in Klammer gesetzten Minuszeichen ausgedrückt.

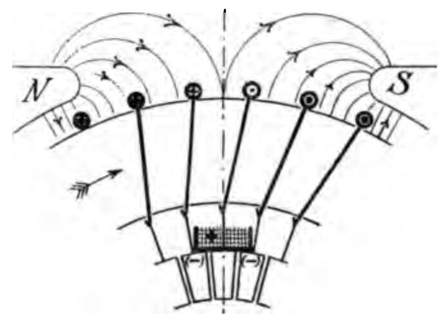


Fig. 274.

b) Für den Fall, daß sich die neutrale Stelle (etwa durch Ankerrückwirkung) in Richtung der Drehung über die Bürsten hinaus verschiebt, wird der unter der positiven Bürste ablaufende Kollektorstab positiv gegen den auflaufenden (vgl. Fig. 275), der unter der negativen ablaufende negativ gegen den auflaufenden. Dieser Fall tritt beispielsweise auf, wenn die Bürste, nach Fig. 274 im Leerlauf eingestellt, bei der belasteten Maschine nicht verschoben wird.

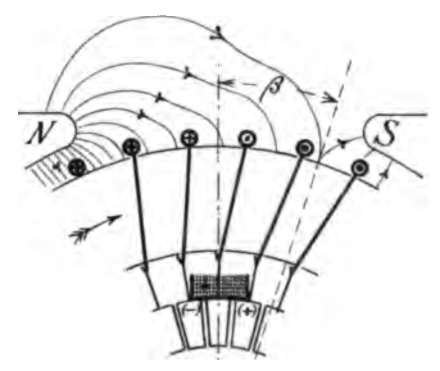


Fig. 275.

Für den mit β bezeichneten Winkel in Fig. 275 wirkt die Induk-

tionsspannung entgegen der fließenden Stromstärke. Für die nicht durch die Bürste geschlossenen Windungen ist das bedeutungslos, denn das ergibt nur eine geringe Schwächung der EMK des Ankers.

2. Wenn allein der Spannungsverlust nach dem Ohmschen Gesetz vorhanden wäre, so würde gelten: Die an der Bürste auflaufenden und ablaufenden Kollektorstäbe besitzen höhere Spannung als die Bürste (vgl. Fig. 276). Die durch die Bürste geschlossenen Spulen sind mit dem Material der Bürste parallelgeschaltet. Der Ersatzwiderstand dieser Verzweigung ist mit dem Strome zu multiplizieren, um diesen Spannungsabfall zu erhalten. Die Kollektorstäbe unter den Bürstenkanten sind daher, wenn nur diese Erscheinung berücksichtigt wird, gegen den mittleren positiv unter der Plusbürste, negativ unter der Minusbürste.

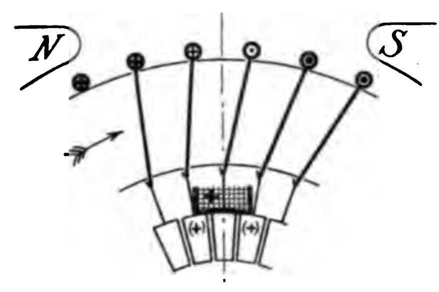


Fig. 276.

3. Wenn allein die Selbstinduktion der an den Bürsten vorbeiwandernden Spule vorhanden wäre, so würde gelten: Bei der Bewegung einer Spule über die Bürstenauflagestelle hinweg wechselt in ihr die Stromrichtung, oder, was dasselbe heißt: Der Strom der Spule geht beim Überfahren der Bürste durch Null hindurch zur gleichen Stärke in entgegengesetzter Richtung über. Ein solcher Vorgang ist nach § 67, 11. Versuch mit einer Selbstinduktionsspannung verbunden, die im Sinne des verschwindenden und gegen den entstehenden Strom wirkt, also ist das Vorzeichen dieser Spannung für beide Teile des Vorganges dasselbe.

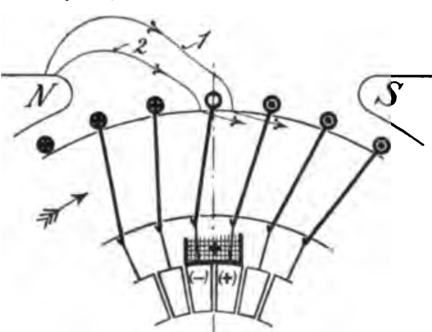


Fig. 277.

Dieser Vorgang ist mit einer Änderung des Verlaufes des Kraftflusses während der Stromwendung verbunden. Über diese Änderung gibt Fig. 277 Aufschluß: Kommt der gerade auf der Symmetrieachse liegende Draht von links her stromführend an, so umgibt ihn ein Teil des Kraftflusses nach Art der mit 1 bezeichneten Kurve. Durch die Stromwendung wird dieser Teil in die mit 2 bezeichnete Bahn gedrängt, durchsetzt also nach erfolgter Kommutation die Schleife bzw. Ankerspule. Die Folge dieser Änderung ist nach den in § 67 bei Gelegenheit des 11. Versuches gemachten Angaben, daß der an der Plusbürste ablaufende Kollektorstab positiv

gegen den auflaufenden, der an der Minusbürste ablaufende negativ gegen den auflaufenden ist.

Die unter 1. 2. und 3. angeführten Erscheinungen ergeben etwa folgendes mit Fig. 278 schematisch gezeichnetes Gesamtbild für die Spannungen unter der Bürste einer belasteten Maschine, wobei von den unter 1. angeführten Fällen der Fall b angenommen wird; die Bürste überdeckt einen Kollektorteil ungleichen Potentiales; die Ungleichheit vergrößert sich mit zunehmender Belastung; das Potential der Bürste liegt zwischen demjenigen der auflaufenden und ablaufenden Kollektorstäbe. Die Spannungen zwischen Bürste und Kollektor setzen sich zusammen aus den Spannungen der unter 1. bis 3. behandelten Fälle; der Index der einzelnen Spannungswerte e deutet in Fig. 278 die Zugehörigkeit zu dem Fall gleicher Nummer an. Die Folge dieser Potentialdifferenzen ist ein durch die kurzgeschlossenen Ankerspulen und durch das Bürstenmaterial fließender Strom, der, wenn er allein da wäre, für den Fall der Fig. 278 im Sinne

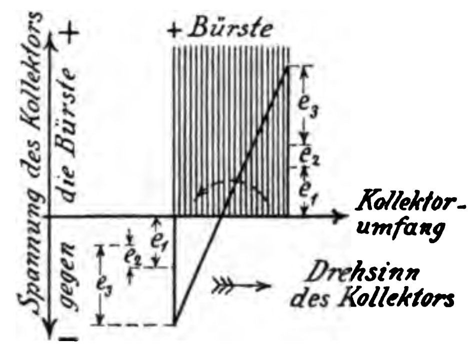


Fig. 278.

des gerissen eingezeichneten Pfeiles auftreten würde. Zusammen mit dem abgenommenen Strom ergibt sich: An derjenigen Bürstenkante, wo die Kollektorstäbe ablaufen, ist für symmetrisch zu den Polen stehende Bürsten die Stromdichte größer als an der entgegengesetzten Kante, an der sogar Stromumkehr eintreten kann. Diese Kurzschlußströme verursachen das Feuern. Damit das Feuern nach Möglichkeit unterdrückt wird, dürfen die Potentialdifferenzen unter der Bürste gewisse Werte nicht überschreiten, und außerdem ist dafür zu sorgen, daß der spezifische Widerstand des Bürstenmaterials groß genug ist.

Aus dieser Betrachtung erklärt sich, weshalb Kohlebürsten leichter funkenfrei laufen als Kupferbürsten. Durch die Kohle wird in den kurzgeschlossenen Kreis ein im Vergleich zum Widerstand der Ankerspule erheblicher Widerstand eingeschaltet; der Kurzschlußstrom ist daher bei Kohlebürsten geringer als bei Kupferbürsten.

Stellt man die Bürste so, daß die kurzgeschlossenen Ankerspulen in Richtung des Drehsinnes etwas über die neutrale Stelle der belasteten Maschine hinaus in dem beginnenden Felde des nächsten Magnetpoles liegen, so kann die nun mit entgegengesetztem Vorzeichen gegen Fig. 278 auftretende Induktionsspannung e_1 die Selbstinduktionsspannung e_3 teilweise kompensieren, so daß die Kommutationsverhältnisse gebessert werden. Diese Erscheinung ist mit Rücksicht auf das Schneiden von

Kraftlinien so zu erklären, daß der in Fig. 277 mit 1 bezeichnete Kraftfluß während der Stromwendung sofort zur Polspitze S übergeht, während er in der Bürstenstellung der Fig. 277 durch die der Stromwendung unterworfene Spule hindurch zu S gelangt. Die durch die Kurven A und B in Fig. 267 angedeutete Feldveränderung hat das Gegenteil von dem zur Folge, was für die Kommutation gewünscht wird: Steht eine Bürste an der mit b in Fig. 267 bezeichneten Stelle, so nimmt mit wachsender Strombelastung das Wendefeld ab, während eine Steigerung erwünscht wäre.

Die Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kollektor lassen sich durch einen Versuch ermitteln, indem man an den Enden der Anschlußdrähte eines Spannungsmessers für niedrige Voltzahlen Spitzen anbringt und die eine Spitze dicht über der Lauffläche einer Bürste in das Bürstenmaterial sticht, während die andere dicht dabei auf dem Kollektor schleift. Mißt man die so erhaltene Spannung, und wiederholt man diesen Versuch etwa von mm zu mm der Bürstenbreite fortschreitend sowohl für verschiedene Belastungen der Maschine, als auch für verschiedene Bürstenstellungen, so erhält man einen Einblick in die Vorgänge, und man kann danach die etwa vorhandenen Fehler beurteilen. Außer den Angaben aus § 78 betreffend den funkenlosen Gang der Maschine und die Strombelastung der Bürsten gilt: Die höchste Spannung zwischen Bürste und Kollektor darf unter Voraussetzung von Kohlebürsten im allgemeinen 3,5 Volt nicht überschreiten. Die zulässige Grenze ist bei Kupferbürsten sehr verschieden und kann von 0,25 Volt bis zu 3,0 Volt betragen.*

Häufig bildet die Anforderung des funkenlosen Ganges die Grenze der Belastung, während eine zweite höher liegende Grenze, die durch die Erwärmung gesetzt ist, nicht in Frage kommen kann.

G. Wendepole.

Bereits in den Erörterungen zu Fig. 278 wurde darauf hingewiesen, daß die Potentialunterschiede unter der Bürste angenähert aufgehoben werden können, wenn die durch den Wendevorgang hervorgerufene Selbstinduktionsspannung einen gleich großen Gegenwert durch eine Induktionsspannung findet. Es gehört dazu, daß die der Stromwendung unterworfenen Leiter sich in einem Felde abgepaßter Stärke und von der unter dem nächstfolgenden Magnetpole auftretenden Richtung befinden. Da bei Vergrößerung des Ankerstromes auch eine Erhöhung der Selbstinduktionsspannung auftritt, kann letztere auch nur durch Anwendung eines verstärkten Wendefeldes kompensiert werden, das in der Regel durch Verschiebung der Bürsten zum nächstfolgenden Pole hin erreicht wird. Bei den Wendepolmaschinen erzeugt man an der Kommutationsstelle durch einen Hilfspol und einige Hauptschlußwindungen ein Feld, das sich mit wachsendem Ankerstrome vermehrt, und in dem die hindurchstreichenden Ankerdrähte diejenige

* Die hier gemachten Zahlenangaben sind aus „Arnold, Die Gleichstrommaschine I" (J. Springer, Berlin) entnommen.

Induktionsspannung erhalten, die der Selbstinduktionsspannung das Gleichgewicht hält. Durch geeignete Zahl der Hauptschlußwindungen läßt sich erreichen, daß die Kompensation praktisch vollkommen ist. Den notwendigen Verlauf dieses Kompensationsfeldes und des kompensierenden Stromes zeigt Fig. 279. Sie läßt erkennen, daß die Amperewindungen der Wendepole den Ankeramperewindungen entgegengerichtet sind, so daß dadurch der Ankerrückwirkung gesteuert wird. Die Veränderung des Feldes durch die Kompensationswicklung ist in Fig. 279 übertrieben gezeichnet. Ein Blick auf Figg. 259 und 279 läßt schließen, daß durch Zusammenwirken von Ankeramperewindungen und Kompensationsamperewindungen der wesentliche Teil des Kraftflusses von Nullast bis Vollast unabgelenkt den Anker nach Art von Fig. 258 durchsetzen muß.

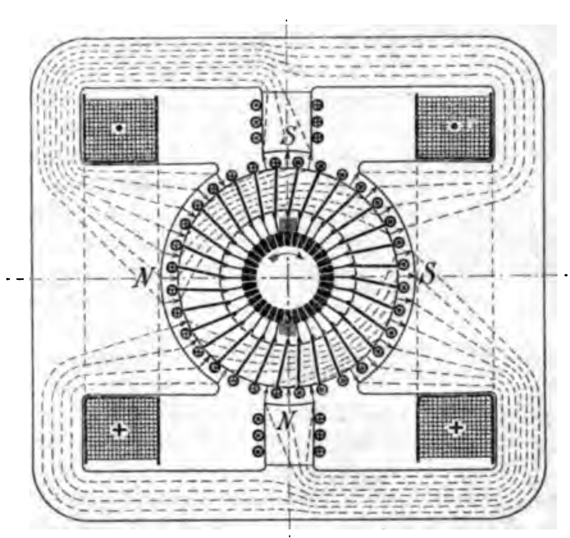


Fig. 279. Wendepole.

Durch Wendepole erreicht man es, daß die Funkengrenze für feststehende Bürsten weit hinausgeschoben wird, und die durch die Erwärmung der Maschine gegebene Grenze für diesen Fall praktische Bedeutung erlangt.

§ 83. Mehrpolige Maschinen.

A. Das Gestell mehrpoliger Maschinen.

Über eine gewisse Leistung hinaus verwendet man Maschinen mit mehreren Magnetpolen. Es wechselt dabei stets ein Südpol mit einem Nordpol, so wie es Fig. 280 unter Einzeichnung der magnetischen Kreise für den Fall einer vierpoligen Maschine darstellt. Fig. 280 gibt zugleich den normalen Fall an, in dem, wie bei den üblichen zweipoligen Maschinen, das Magnetgestell den Anker außen umschließt. Zweipolige Maschinen für größere Leistungen würden den Übelstand aufweisen, daß sämtliche Teile, das Ankereisen, die Magnetwicklungen usw., sehr große Querschnitte bekommen. Es spricht hier dieselbe Erscheinung mit, wie sie bei den strombelasteten Drahtquerschnitten

auftritt, daß mit größer werdenden Abmessungen eines Körpers das Volumen schneller zunimmt als die Oberfläche; daß die Oberfläche die Aufgabe erfüllen muß, die in dem Material auftretenden und in Wärme umgesetzten Verluste abzuleiten; daß zu einem bestimmten Verlust eine bestimmte Oberfläche erforderlich ist, wenn die Temperatur nicht zu hoch werden soll; daß eine geringere spezifische Beanspruchung der Materialien bei großen Formen nötig ist als bei kleinen, wenn gleiche Erwärmung auftreten soll.

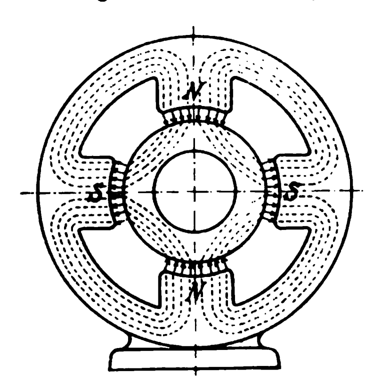


Fig. 280. Gestell und Kraftflüsse einer vierpoligen Maschine.

Mit wachsender Polzahl nimmt der Anker mehr und mehr die Form eines Rades an. Der Querschnitt des Ankereisens und der Magnetspulen, sowie der Wicklungsraum des Ankers kann in den für die Abkühlung günstigen Grenzen gehalten werden. Mit zunehmender Leistung trifft eine wesentliche Vergrößerung zur Hauptsache den Anker- und Kollektordurchmesser.

Über die Leistungsgrenze, bis zu der Maschinen zwei- und mehrpolig gebaut werden, lassen sich bestimmte Zahlenangaben nicht machen. Es gibt Firmen, die schon für 2 KW mehrpolige Typen verwenden, während bis zu 20 KW zweipolige Maschinen vorkommen.

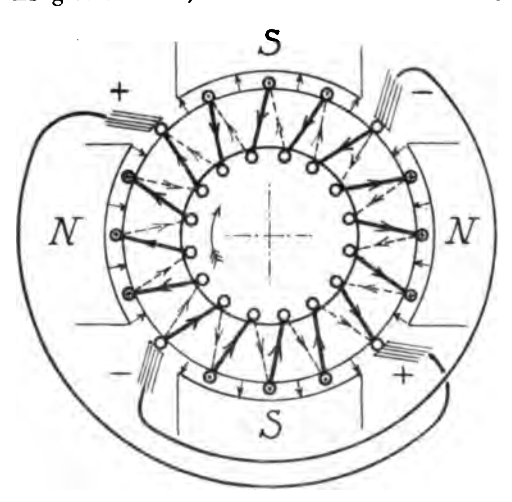


Fig. 281. Gewöhnlicher Ring in vierpoliger Bohrung.

B. Die gewöhnliche Ringwicklung bei mehrpoligen Maschinen.

Wir lassen einen Ring, der genau so gewickelt ist wie für eine zweipolige Maschine, innerhalb der Polbohrung einer mehrpoligen Maschine laufen. Bei dem in der Fig. 281 angegebenen Drehsinn erhalten wir dann unter den Nordpolen Spannungen, die einen Strom in die Bildebene hinein zu schicken bestrebt sind, unter den Südpolen wirken die Spannungen in entgegengesetzter Richtung. Verfolgt man die Richtung der Ströme, die erzeugt werden können, an den beiden Stirnseiten, so sieht man, daß überall zwischen

zwei Polen ein ausgezeichneter Draht liegt, und zwar strömt an der einen Stelle die Elektrizität von 2 Seiten auf den Draht zu, an der nächsten nach 2 Seiten vom Draht ab. Das wiederholt sich abwechselnd.

Sehen wir jeden auf dem äußeren Ankerumfang der Fig. 281 liegenden Draht als einen Kollektorstab an und jede zwischen zwei benachbarten Kollektorstäben gezeichnete Verbindung als eine Ankerspule, so besagt das Schema: Es sind ebensoviel Bürstenauflagestellen am Kollektor vorhanden, als die Maschine Magnetpole aufweist.

Bei Ankern dieser Art können nur alle positiven Bürsten miteinander und alle negativen miteinander verbunden werden, wie es die stark ausgezogenen Linien im vierpoligen Schema andeuten. Die Verbindungen bestehen in diesem Falle aus kreisförmig gebogenen und an der Bürstenbrücke angebrachten Kupferschienen. Zwischen den Schienen erhält man unter Vernachlässigung der Verluste dieselbe Spannung, wie sie unter einem Polschuh erzeugt wird. Der den

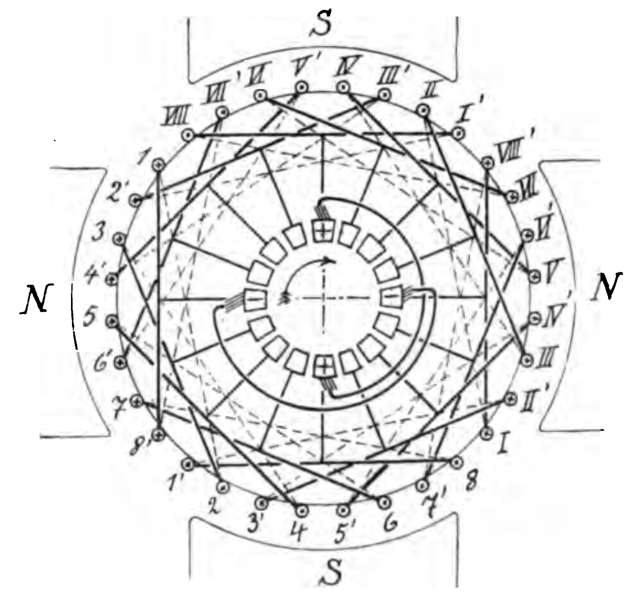


Fig. 282. Vierpolige Trommel.

Schienen entnommene Strom durchfließt den Anker in ebensoviel parallelgeschalteten Zweigen, als die Maschine Magnetpole aufweist. Daher gestattet die vierpolige Maschine die vierfache, die sechspolige die sechsfache usw. Stromstärke gegenüber derjenigen des einzelnen Ankerdrahtes abzunehmen.

C. Mehrpolige Trommelanker mit Parallelschaltung.

Bei mehrpoligen Trommelwicklungen, deren einzelne Teile parallelgeschaltet sind, wiederholt sich von Pol zu Pol die Wicklung, wie sie

bisher für eine zweipolige Maschine bekannt ist. Ein Vergleich der Figg. 227 und 280 besagt, daß eine Trommel, die für zwei Pole gewickelt ist, für vier Pole nicht verwendet werden kann. An einer Trommelwicklung läßt sich die Polzahl der Maschine erkennen, zu der die Trommel gehört. Ein Schema einer vierpoligen Trommelwicklung zeigt Fig. 282, bei der zugleich arabische und römische Zahlen angewendet sind zum Auseinanderhalten der Teile der Wicklung. Die Zahlen und die Wicklung haben dieselbe Aufeinanderfolge, wie bei der zweipoligen Trommel Fig. 227, daher ist die Figur ohne weiteres verständlich. Die gerissen angedeuteten Linien der Fig. 282 können als ganze Spulen gedacht sein, während die ausgezogenen Linien als vorn liegende einzelne Drähte anzusehen sind, durch welche die Spulen verbunden werden. Die Verbindung zweier aufeinanderfolgender Spulen geschieht wiederum am Kollektor.

Sämtliche im letzten Absatz von B dieses Paragraphen gemachte Angaben gelten auch für diese Trommelwicklung.

D. Äquipotentialverbindungen.

An Stelle der an der Bürstenbrücke angebrachten Schienen können auch mit dem Anker umlaufende Verbindungen die Parallelschaltung besorgen. In Fig. 283 sind solche Verbindungen für den Fall des Ringankers einer sechspoligen Maschine eingezeichnet, und zwar zur leichteren Übersicht in den Kollektor hinein. Sie verbinden dauernd diejenigen Kollektorstäbe untereinander, die sich auf dem gleichen Potential befinden. Sie sind daher bei gut ausgeglichenen Maschinen stromlos, falls die zugehörigen Kollektorstäbe sich nicht unter einer Bürste befinden; dagegen können sie zur Stromlieferung von den übrigen Bürstenauflagestellen gleichen Vorzeichens her zu der einen tatsächlich vorhandenen Stromabnahmestelle dieses Vorzeichens hin herangezogen werden. Es ist daher möglich, obgleich eine Parallelschaltung stattfindet, nicht mehr wie ein Paar der Stromabnahmestellen mit Bürsten zu versehen. Das geschieht, wenn die abgenommene Stromstärke nicht zu groß ist. Aber auch für den Fall, daß sämtliche in Frage kommende Stellen des Kollektors zur Stromabnahme dienen, gewähren

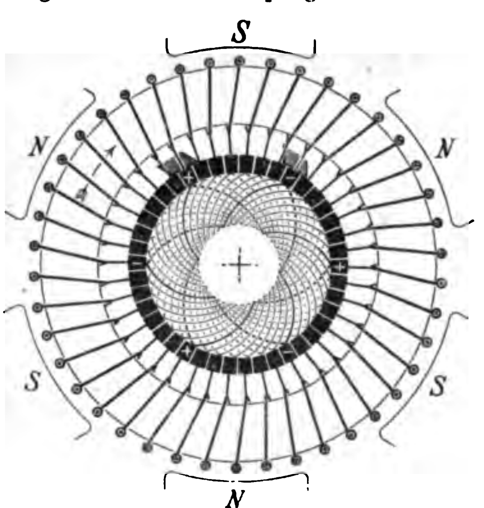


Fig. 283. Äquipotentialverbindungen.

Äquipotentialverbindungen den Vorteil, daß Ausgleichsströme nicht durch die Bürsten gehen.

E. Ausgleichsströme innerhalb mehrpoliger Maschinen.

Bei den bisher behandelten mehrpoligen Ankern sind die einzelnen Teile der Ankerwindungen parallelgeschaltet, so wie es für den Fall von sechs Zweigen die Fig. 284 in einem einfachen Schema darstellt. Es ist darauf zu sehen, daß in jeder Abteilung der Wicklung dieselbe Spannung erzeugt wird. Im entgegengesetzten Falle würden nämlich innerhalb des Ankers Ströme entstehen, die nicht nutzbar in den Außenkreis gelangen und leicht hohe Werte annehmen.

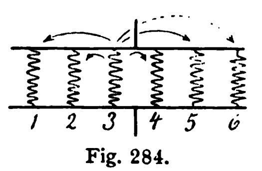


Fig. 284.

In dem Schema Fig. 284 sei Spule Nr. 3 von etwas höherer Spannung. Die Pfeile zeigen dann den Verlauf der von ihr ausgehenden Ströme an. Diese Ströme erwärmen nutzlos die Ankerwicklung und vermehren die Leistungsverluste in der Maschine. Solche Erscheinungen treten auf, wenn ein Polschuh mehr Kraftlinien enthält als die übrigen, was durch ungleiches Material des Magnetgestelles oder exzentrisch gelagerten Anker am leichtesten vorkommt. Nach dieser Richtung hin sind mehrpolige Maschinen durch die aufgebrachte Windungszahl der Magnetspulen auszugleichen. Störender noch als die genannten Fehler sind Wicklungsfehler in dem Sinne, daß die parallelgeschalteten Ankerwicklungsteile ungleiche Drahtzahl besitzen, denn für diesen Fall tritt die Wärme stets in demselben Teile am größten auf. Ebenso ruft eine ungleichmäßige Verteilung der Wicklung Ausgleichsströme hervor.

F. Betrachtungen im Anschluß an die bisher behandelten Anker.

Das Gebiet der Ankerwicklungen ist groß, und die hier angeführten Schemata erläutern nur die einfachsten aber auch die häufigst angewandten Fälle. Sie sind anwendbar, wenn der Anker der zweipoligen Maschine eine durch 2 teilbare Spulenzahl hat; bei dem Ring enthält jede Windung einen, bei der Trommel jede Windung 2 wirksame Ankerdrähte. Für mehrpolige Maschinen mit p Polpaaren folgt für diese einfachen Wicklungen, daß die Spulenzahl des ganzen Ankers durch $2p$ teilbar sein muß. Da die Verbindung einer jeden Spule mit der nächsten am Kollektor erfolgt, ist die Zahl der Ankerspulen stets gleich der Zahl der Kollektorstäbe. Für die Einteilung des Ankers ist die Zahl der Kollektorstäbe von einer Plus- zu einer benachbarten Minusbürste von Einfluß; die Spannung von Kollektorstab zu Kollektorstab darf gewisse Werte (üblicherweise 10 bis 15 Volt, maximal 30 Volt bei Hochspannungsmaschinen) nicht überschreiten, so daß dadurch auch die Spulenzahl ihr Mindestmaß erhält. Die Zahlen gelten für die Maximalwerte der in Fig. 267 gegebenen Kurve für den Belastungsfall. Meistens gibt die Bedingung, daß die Selbstinduktion einer Ankerspule zum Zweck funkenfreier Stromwendung gering sein soll, mehr Kollektorstäbe von Bürste zu Bürste als obige Spannungsbedingung;

die Selbstinduktion ist wesentlich abhängig von der Zahl der Windungen einer Spule; diese Windungszahl soll zur Verringerung der Selbstinduktion möglichst klein gehalten sein.

Die Zahl der Windungen auf dem Anker rundum bestimmt sich aus der in § 80 angeführten Gleichung

$$E_{\text{Volt}} = 10^{-8} \cdot \mathfrak{N} \cdot z \cdot n'$$

zu

$$z = \frac{E_{\text{Volt}}}{\mathfrak{N} \cdot n'} \cdot 10^8,$$

wobei

E die EMK des Ankers,
$\mathfrak{N}$ die Zahl der Kraftlinien auf einen Magnetpol und
n' die Umlaufszahl in der Sekunde

bedeutet. Wird dieses z durch die Zahl der Ankerdrähte einer Spule dividiert, so erhält man die Zahl der Ankerspulen und der Kollektorstäbe. Obige Gleichung gilt für alle bisher behandelten Anker zwei- und mehrpoliger Maschinen. Die Gesamtzahl der Kollektorstäbe ist durch die Zahl der Magnetpole zu teilen, damit die Zahl der Stäbe von Bürstenmitte zu Bürstenmitte erhalten wird.

Nehmen wir an, es läge eine Reihe von Maschinen gleicher Breite (Breite heißt im Dynamobau stets die Abmessung in axialer Richtung) und gleicher Kraftlinienzahl auf jeden Pol vor, wobei auch der Polbogen und der Abstand von Polspitze zu Polspitze das gleiche Längenmaß aufweisen soll, so folgt daraus, daß der Ankerumfang proportional zur Zahl der Polpaare wächst. Soll die Ankerwicklung in allen Fällen die gleiche radiale Schichtdicke aufweisen, so heißt das, der Wicklungsraum des Ankers nimmt proportional zum Ankerumfang, also auch proportional zur Polzahl zu. Für gleiche Umfangsgeschwindigkeiten des Ankers, die infolge gleicher Zugbeanspruchung im Ankerquerschnitt durch Fliehkräfte und infolge gleicher Stromwendungsverhältnisse in Frage kommen, folgt, daß die Zahl der Ankerdrähte rundum, gleiche Drahtdurchmesser vorausgesetzt, proportional zur Zahl der Polpaare steigen muß, wenn die gleiche Spannung erzeugt werden soll. Für diese Vermehrung ist nach obigen Voraussetzungen gerade der Raum vorhanden. Die Erhöhung der Leistung bei mehrpoligen Maschinen ist daher unter obigen Voraussetzungen direkt proportional zur Zahl der Polpaare. Die Stromstärke wird bei gleicher Spannung vergrößert proportional zur Polzahl durch Parallelschaltung von Ankerkreisen gleicher Stromstärke.

Bei dem durch Fig. 270 angedeuteten Verfahren der Schablonenwicklung liegen in jeder Nut zwei Spulenseiten, daher ist die Zahl der Nuten gleich der Zahl der Kollektorstäbe. Bei mehrpoligen Trommeln bietet die Schablonenwicklung leichtere Herstellung als bei zweipoligen, denn der Prozentsatz der zum Schluß unterzuschiebenden Spulenseiten wird mit wachsender Polzahl geringer;

außerdem lassen sich die Schablonenspulen bei mehrpoligen Trommeln besser einlegen (vgl. Fig. 272), da die Spulen ohne Verbiegung in die Nuten eingebracht werden können.

Eine fertige Schablonentrommel einer mehrpoligen Maschine zeigt Fig. 285. Sie besitzt auf der Kollektorseite Mantelwicklung, an der Seite der Riemscheibe Stirnwicklung.



Fig. 285. Mehrpolige Schablonentrommel.

Entgegen der durch die Figuren 270 und 282 angegebenen Anordnung liegt ein Vorteil darin, wenn die kürzeren Stirnverbindungen zu Spulen vereinigt werden (also die Verbindungen 2 ÷ 3, 4 ÷ 5 usw.), während die längeren (1 ÷ 2, 3 ÷ 4 usw.) einzelne an den Kollektor angeschlossene Verbindungsdrähte bedeuten. Man spart dadurch an Drahtmaterial und verringert dadurch zugleich den Widerstand des Ankers. Die Spulen nehmen vorteilhaft einen solchen Winkel ein, bei dem nicht beide Spulenseiten zugleich unter einen Pol zu liegen kommen.

Unter Berücksichtigung dieses Vorteiles wird aus der Fig. 282 für Zahnanker und Schablonenwicklung nun das Schema Fig. 286, das zur leichteren Übersicht ungeschlossen gezeichnet ist.

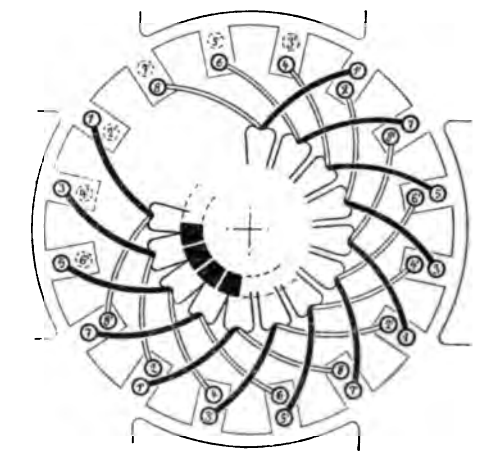


Fig. 286. Schema einer mehrpoligen Schablonentrommel.

G. Anker mit Reihen-(Serien-)wicklung.

Fig. 287 stellt mit 30 Ankerdrähten ein Schema einer vierpoligen Trommel dar, deren Wicklung, wie bei einer zweipoligen Maschine, nur zwei parallelgeschaltete Kreise besitzt. Die Hälfte sämtlicher Leiter sind in jedem Kreise hintereinandergeschaltet.

Die Stromstärke des Außenkreises ist hierbei die zweifache derjenigen des einzelnen Ankerdrahtes, wie bei einer zweipoligen Maschine. Die Spannung hingegen erhöht sich gegen den in § 80 angegebenen Wert bei p Polpaaren nun auf den p-fachen Betrag:

$$E_{\text{Volt}} = p \cdot \mathfrak{N} \cdot z \cdot n' \cdot 10^{-8},$$

wobei

$\mathfrak{N}$ wieder die Kraftlinienzahl eines Poles,
z die Zahl der Ankerdrähte rundum,
n' die Umlaufszahl in der Sekunde und
E die EMK des Ankers

bedeutet. In Fig. 287 können wiederum die durch gerissene Linien angedeuteten Verbindungen als Ankerspulen, die ausgezogenen als einzelne an den Kollektor angeschlossene Verbindungsdrähte aufgefaßt werden.

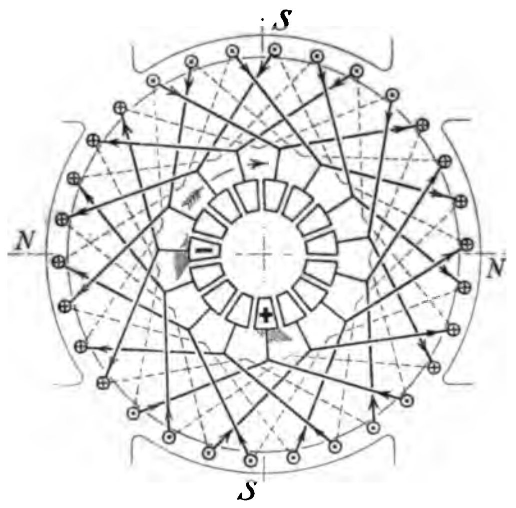


Fig. 287. Reihenanker.

Nehmen wir an, daß jedesmal zwei in obigem Schema nebeneinander liegende Spulenseiten in einer Nut untergebracht werden, so erhalten wir ebensoviel Ankerteilungen als Kollektorteilungen, an Zahl $m = 15$. Die hinten liegende, als Spule deutbare Verbindung gehe über 3 Ankerteile, oder was dasselbe heißt, der hintere Wicklungsschritt betrage $y_1 = 3$; die vordere Verbindung erstrecke sich über 4 Teilungen, d. h. der vordere Wicklungsschritt betrage $y_2 = 4$. Bei der hier vorliegenden Wicklung erfolgen beide Teilschritte in demselben Drehsinn, so daß sich als gesamter Wicklungsschritt

$$Y = y_1 + y_2 = 3 + 4 = 7$$

ergibt. Rechnet man auf einen Pol T Teile, in unserem Fall $T = 15:4$, so ergibt sich Y nahezu gleich $2\,T$. Eine Wicklung dieser Art mit Teilschritten im gleichen Sinn heißt eine Wellenwicklung. Bei der Schleifenwicklung erfolgen beide Teilschritte in einander entgegengesetztem Sinn, wie Fig. 286 zeigt; auch hier ist der hintere Teilschritt $y_1 = 3$, der vordere $y_2 = 4$, der resultierende hingegen $Y = y_2 - y_1 = 4 - 3 = 1$.

Wenn der Ankerumfang m in Ankerteilen gemessen nicht durch

Y teilbar ist, so ist nach einem Umgang eine Differenz von a Ankerteilen vorhanden. Bei den einfachen oben gegebenen Schleifenwicklungen ist $Y = 1$ und $a = 0$, also schließen sich diese Wicklungen nach einem Umgang. Die Wellenwicklung hingegen darf sich nach einem Umgang nicht schließen, daher muß a von Null verschieden sein. Die Wellenwicklung befolgt bei einer Maschine mit p Polpaaren das Gesetz:

$$p \cdot Y = m \pm a.$$

Das Schema Fig. 287 hat $a = 1$ und $p = 2$ daher wird für diesen Fall aus obiger Gleichung:

$$2 \cdot 7 = 15 - 1.$$

Für den Fall $a = 1$ entsteht die Reihenwicklung, gekennzeichnet durch nur 2 Stromkreise. Für $a > 1$, was nur bei vielpoligen Maschinen in Frage kommt, entstehen mehr als zwei Stromkreise (4, 6, 8 usw.) und die so geschaffene Wicklung heißt die Serienparallelwicklung (Arnold).

§ 84. Rechnungen.

A. Die Bilanz.

Die erste Gesetzmäßigkeit, an die bei der Belastung eines Stromerzeugers zu denken ist, bildet das Ohmsche Gesetz. Falls eine bestimmte EMK erzeugt wird, ergibt sich der Strom umgekehrt proportional zum Widerstand des Kreises, der bei dem geringen Ankerwiderstand im wesentlichen durch den Widerstand des Außenkreises gebildet wird. Die erste Anlehnung wird daher ausgesprochen in dem Satz: Man braucht nur einen genügend kleinen Widerstand (eine genügend große Anzahl von Lampen) zwischen die Klemmen zu legen, so wird der Strom beliebig stark.

Unter Berücksichtigung weiterer Gesetzmäßigkeiten werden hingegen für die Belastung einer Maschine eine Reihe von Grenzen gesetzt.

Das in zweiter Linie anzuführende Gesetz ist das Gesetz von der Erhaltung der Leistung. Es ist mit § 67, 9. Versuch, erkannt worden, daß ein Induktionsstrom gegen das ihn erzeugende Feld unter dem Einfluß einer mechanischen Kraftwirkung steht. Wird die Induktionserscheinung durch Bewegen eines Drahtes durch ein Feld hervorgerufen, so sucht die Kraftwirkung die Bewegung zu hemmen. Es gilt hier (vgl. § 70, C):

$$P = \frac{1}{9810000} \cdot \mathfrak{H} \cdot I \cdot l,$$

wobei $\mathfrak{H}$ die induzierende Feldstärke,
I den Strom im Anker (Ampere) (Summe aller Kreise),
l die in dem Felde $\mathfrak{H}$ liegende Drahtlänge (cm) (eines Kreises),
P die am mittleren Wicklungsradius angreifende Kraft (kg)

bedeutet. Durch Multiplikation dieser Kraft mit der Umfangsgeschwindigkeit erhält man eine zur Erzeugung der Induktionswirkung aufzu-

wendende mechanische Leistung, deren Wert auf elektrisches Maß übergeführt

$$L_m = P \cdot v \cdot 9{,}81$$

beträgt, wobei weiterhin unter

L_m = mechanische, beim Induktionsvorgang auftretende Leistung (Watt)

v = am mittleren Wicklungsradius auftretende Geschwindigkeit (m / Sek.)

zu verstehen ist. Diese mechanische Leistung ist unter Vernachlässigung einiger noch zu beleuchtender Verluste gleich der am Anker auftretenden elektrischen Leistung L_e:

$$L_m = L_e$$

$$P \cdot v \cdot 9{,}81 = E \cdot I;$$

dabei ist unter

E = die am Anker erzeugte EMK (Volt);

I = die dem Anker entnommene Stromstärke (Ampere)

verstanden. Also bei konstantem E würde die dem Anker zuzuführende mechanische Leistung direkt proportional zur abgenommenen Stromstärke sein.

Die verfügbare mechanische Leistung bildet eine Grenze für die entnehmbare elektrische Leistung. Ein leerlaufender Stromerzeuger nimmt weniger Leistung auf als ein belasteter. In welchem Maße außer der Nutzleistung noch weitere Leistung mechanisch zugeführt werden muß, darüber gibt die Bilanzgleichung Aufschluß, die in Worten lautet: Die hineingeschickte Leistung ist gleich der Summe der Nutzleistung und der Verlustleistung.

Verluste treten auf:

1. als Wärme in der Ankerwicklung,
2. als Wärme in den Magnetwindungen,
3. durch Hysteresis des Ankereisens,
4. durch Wirbelströme im Ankereisen und in den Ankerdrähten,
5. durch mechanische Reibung in den Lagern und an der Luft.

Bedeutet:

L_1 = gesamte, dem Stromerzeuger zugeführte Leistung (Watt),
L_2 = dem Stromerzeuger entnommene Nutzleistung (Watt),
L_A = Verlustleistung in der Ankerwicklung (Watt),
L_M = „ „ „ Magnetwicklung (Watt),
L_H = „ durch Hysteresis (Watt),
L_W = „ „ Wirbelströme (Watt),
L_R = „ „ mechanische Reibung (Watt),
I_A = Stromstärke des Ankers (Ampere),
W_A = Ankerwiderstand (Ohm),
i_M = Stromstärke in der Magnetwicklung (Ampere),

W_M = Widerstand der Magnetwicklung (Ohm),
E' = Nutzspannung der Maschine (Volt),
I = Nutzstrom der Maschine (Ampere),

so ist die Bilanzgleichung zu schreiben:

$$L_1 = L_2 + L_A + L_M + L_H + L_W + L_R$$

oder:

$$L_1 = E' \cdot I + I_A^2 \cdot W_A + i_M^2 \cdot W_M + (L_H + L_W + L_R).$$

Der Wirkungsgrad eines Stromerzeugers ergibt sich demnach zu

$$\eta = \frac{E' \cdot I}{E' \cdot I + I_A^2 W_A + i_M^2 \cdot W_M + (L_H + L_W + L_R)}.$$

Es sei hier bemerkt, daß die zugeführte Leistung L_1 mit Riemendynametern (Hefner-Alteneck, Fischinger) gemessen werden kann, und daß somit zur Bestimmung von η außer dieser Messung nur noch die Klemmenleistung L_2 gemessen zu werden braucht. Mit gleichzeitiger Messung von I_A, W_A, i_M und W_M bekommt man daher die Summe $(L_H + L_W + L_R)$.

Verluste sind gering zu halten; L_A kann nur durch geringes W_A, L_M durch geringes i_M bei Nebenschlußwicklungen oder geringes W_M bei Hauptschlußwicklungen klein gehalten werden; wie L_H und der auf das Ankereisen entfallende Teil von L_W klein zu halten ist, zeigen folgende erfahrungsmäßig aufgestellte Ausdrücke:

In Erweiterung der in § 69, D gegebenen Formel für die Hysteresisarbeit für den Zyklus ergibt sich die im Ankereisen von V cdm, das seine magnetische Dichte zwischen den Werten $\pm \mathfrak{B}$ wechselt, auftretende Verlustleistung durch Hysteresis bei einer Maschine mit p Polpaaren und n' Umläufen in der Sekunde zu:

$$L_H = \frac{1}{6} \cdot V \cdot p \cdot n' \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \cdot 10^{-6} \text{ Watt.}$$

Für den Wirbelstromverlust im Ankereisen, für den außer den oben angegebenen Werten auch noch die Dicke δ (in mm) der Ankerbleche in Frage kommt, wird nach dem Ausdruck gerechnet:

$$L_W = 2 \cdot V(p \cdot n')^2 \cdot \delta^2 \cdot \mathfrak{B}^2 \cdot 10^{-10} \text{ Watt.*}$$

Als Verlustziffer versteht man die in Watt/kg angegebene Verlustleistung durch Hysteresis und Wirbelströme zusammen für $\mathfrak{B} = 10000$ und für 50 Zyklen in der Sekunde. Sie beträgt für mittlere Bleche etwa 3 bis 4 Watt/kg, kann aber bei besonders guten Materialien etwa auf die Hälfte heruntergehen.

Für die Verlustleistung durch Reibung können schwer genaue Angaben gemacht werden, da es dabei erstens auf Güte und Art der

* Die Konstante 2 gibt eine rohe und meistens zu geringe Annäherung, da die Eisenbleche durch die Bearbeitung an den Oberflächen Berührung untereinander erhalten.

Lagerung und Schmierung ankommt, zweitens auf die Kollektorreibung, die vom Oberflächenzustand des Kollektors, von den verwendeten Materialien und von dem erforderlichen Anpressungsdruck abhängt, und drittens auf die Luftreibung, die häufig dadurch beträchtlich ausfällt, daß im Interesse guter Kühlung eine reichliche Luftzirkulation begünstigt wird. Im Mittel kommt man für roheste Annäherung aus, wenn

$$L_R = 0{,}03\,L_2$$

gesetzt wird.

B. Rechnungsgang für die Vorausberechnung kleiner Maschinen.

Man benutzt zur Berechnung des Ankerdurchmessers eine Erfahrungsformel:

$$D = C \cdot \sqrt[3]{\frac{E' \cdot I}{n} \cdot \frac{D}{B}}, \tag{1}$$

wobei bedeutet:

D = Durchmesser des Ankereisens in cm,
E' = Klemmenspannung der Maschine,
I = Nutzstromstärke der Maschine (Höchstwert),
B = Breite des Ankereisens (in Achsenrichtung) in cm,
n = Umlaufszahl in der Minute,
C = Erfahrungskonstante, die für Ringe etwa = 13, für Trommeln etwa = 11 genommen werden kann.

Ist D bekannt, so rechnet man den Querschnitt des Ankereisens Q_A in qcm aus, nimmt die magnetische Dichte im Ankereisen ungefähr zu

$$\mathfrak{B}_A = 10\,000$$

an, worauf man die Zahl der Einheitslinien, welche das Ankereisen durchsetzen, erhält nach der Gleichung

$$\mathfrak{N}_A = Q_A \cdot \mathfrak{B}_A .$$

Ist Q_A der einfache Umlaufsquerschnitt, so bekommt man die Zahl der an einem Pol auftretenden Kraftlinien zu

$$\mathfrak{N} = 2 \cdot Q_A \cdot \mathfrak{B}_A . \tag{2}$$

Mit diesem Ergebnis geht man in die Gleichung (vgl. § 83, F), welche die Zahl der Ankerdrähte liefert, falls es sich um Anker mit Parallelschaltung handelt:

$$z = \frac{E}{\mathfrak{N} \cdot n'} \cdot 10^8, \tag{3}$$

wobei bedeutet:

z = Zahl der Ankerdrähte rund um den Anker sowohl für zweipolige, wie für mehrpolige Maschinen. Die Zahl der Drähte wird auf eine runde Summe gebracht, die eine gleiche Drahtzahl für jede Spule ermöglicht.
E = EMK des Ankers, d. h. die Nutzspannung E' plus dem Spannungsverluste e in der Ankerwicklung, der je nach Größe der

Maschine zu 2 bis 5 % der Nutzspannung im voraus geschätzt werden muß.

$\mathfrak{N}$ = Zahl der Kraftlinien auf einen Polschuh sowohl bei zweipoligen, wie bei mehrpoligen Maschinen.

n' = Umlaufszahl des Ankers in der Sekunde. Nach der Abrundung von z wird n' korrigiert.

Bei mehrpoligen Maschinen mit Reihenanker ist die rechte Seite der Gleichung (3) durch die Zahl der Polpaare p zu dividieren.

Da die Zahl der Ankerdrähte nun nach Gleichung (3) bekannt ist, läßt sich auch die Länge jedes Zweiges der Ankerwicklung ausrechnen, und man erhält den Gesamtquerschnitt aller parallelgeschalteten Ankerzweige zusammen nach der Formel

$$q = \frac{l \cdot I_A \cdot c}{e}, \tag{4}$$

dabei ist:

q = gesamter Kupferquerschnitt aller Ankerzweige zusammen in qmm;

l = Länge des Kupferdrahtes eines der parallelgeschalteten Ankerzweige von Bürste zu Bürste in m;

I_A = gesamte Ankerstromstärke in allen Ankerzweigen zusammen; bei Nebenschlußmaschinen ist I_A um 2 bis 5 %, je nach Größe der Maschine höher zu schätzen als der Nutzstrom I;

e = Spannungsverlust in der Ankerwicklung, der, wie bereits erwähnt, zu 2 bis 5 % der Nutzspannung geschätzt werden muß;

c = spezifischer Widerstand von Kupfer = 1 : 57.

Man kennt nun den gesamten Kupferquerschnitt q der Ankerwicklung und rechnet den Querschnitt des einzelnen Ankerdrahtes aus, indem man q durch die Zahl der parallelgeschalteten Kreise dividiert. Es muß dann kontrolliert werden, ob die Wicklung samt der Isolierung der Drähte untergebracht werden kann. Ist diese Möglichkeit gewährleistet, so entwirft man das Magnetgestell, in welchem die magnetische Dichte ein beträchtliches Maß über das Knie der Kurve des betreffenden Materials (siehe Fig. 215) gewählt werden muß. Das ist dazu erforderlich, damit man eine brauchbare Charakteristik der Maschine erhält. Zu dem entworfenen Magnetgestell rechnet man die Amperewindungszahl eines magnetischen Kreises aus, die erforderlich ist zur Herstellung der nötigen Kraftlinienzahl. Die nach den Angaben in § 69, F ermittelte Amperewindungszahl ist für die belastete Maschine um 30 bis 40 % zu erhöhen zur Überwindung des Einflusses der Streuung und der Ankerrückwirkung.

Legt man auf jeden Pol eine Magnetisierungsspule, so braucht jede einzelne nur die Hälfte der Amperewindungszahl zu erhalten, die für einen Kreis gerechnet worden ist, auch wenn zwei magnetische Kreise in ihr vereinigt werden.

Aus der Stromstärke, die in den Magnetwindungen fließen soll, und der errechneten Amperewindungszahl jeder Spule ergibt sich die Zahl ihrer Windungen. Es ist wiederum zu kontrollieren, ob die

Wicklung untergebracht werden kann, deren Querschnitt sich aus ihrer Länge, ihrer Stromstärke i_M und der Spannung an ihren Enden berechnet.

Zum Schluß ist sowohl für den Anker, als auch für die Magnetwicklung zu untersuchen, ob die in den Windungen und im Ankereisen erzeugte Wärme genügend austreten kann. Man bedarf auf 1 Watt Verlust einer abkühlenden Außenfläche von etwa 10 qcm.

C. Beispiel für die Vorausberechnung einer Maschine.

Es soll eine Nebenschlußmaschine berechnet werden für die Werte:

Nutzspannung $E' = 120$ Volt,
Nutzstrom $I = 85$ Amp. (maximal),
Umgangszahl $n_{\min} \sim 1000$.

Die Maschine soll als zweipolige Trommel-Maschine ausgeführt werden, Lahmeyertypus, mit Gußstahlgestell; es sei

$B:D$ des Ankers $= 1$ (Quadrattrommel).

Mit Benutzung der unter B dieses Paragraphen gegebenen Bezeichnungen wird:

Durchmesser des Ankereisens:

$$D = C\sqrt[3]{\frac{E' \cdot I}{n}} = 11\sqrt[3]{\frac{120 \cdot 85}{1000}} = 24 \text{ cm}.$$

Der innere Durchmesser des Ankereisens zum Durchbringen der Ankerbuchse wird gewählt zu:

$$D' = 7 \text{ cm}.$$

Der Umlaufsquerschnitt des Ankereisens beträgt:

$$Q_A' = 24 \cdot (12 - 3{,}5) = 204 \text{ qcm};$$

hiervon sind bei einer Blechdicke $\delta = 0{,}5$ mm $10\,\%$ abzuziehen, da das Papier zwischen den Ankerblechen den Eisenquerschnitt verkleinert, so folgt: Eisenquerschnitt des Ankers:

$$Q_A = 184 \text{ qcm}.$$

Zahl der Kraftlinien eines Poles:

$$\mathfrak{N} = 2 \cdot Q_A \cdot \mathfrak{B}_A = 2 \cdot 184 \cdot 10000 = 3680000,$$

Zahl der Ankerdrähte rundum:

$$z = \frac{(E' + e')\,10^8}{\mathfrak{N} \cdot n'} = \frac{(120 + 3)\,10^8}{3680000 \cdot 16{,}66} = 200;$$

gewählt werden 192 Leiter, die in 48 Nuten zu je vier Leitern untergebracht werden sollen. Zwei Leiter in je einer Nut gehören zu derselben Spule, also erhält man 48 Spulen und 48 Kollektorstäbe. Die Maschine ist statt mit 1000 nun mit $n = 1040$ Umdrehungen in der Minute oder $n' = 17{,}33$ Umdrehungen in der Sekunde laufen zu lassen.

Die Länge des Drahtes in einem Ankerzweig wird angenähert bestimmt:

$$l = \frac{z}{2}(B + 1{,}8\,D) = 96\,(24 + 42) = 6400 \text{ cm} = 64 \text{ m}.$$

Der Ankerstrom wird geschätzt zu

$$I_A' = I + i_M' = 85 + 2 = 87 \text{ Ampere}.$$

Der Spannungsverlust im Anker wurde bereits vorläufig angenommen zu

$$e' = 3 \text{ Volt},$$

daher folgt für den Kupferquerschnitt beider Ankerkreise zusammen

$$q' = \frac{l \cdot I_A' \cdot c}{e'} = \frac{64 \cdot 87}{3 \cdot 57} = 32{,}6 \text{ qmm},$$

daher der Querschnitt eines Ankerdrahtes

$$q_D' = 16{,}3 \text{ qmm}.$$

Gewählt wird ein Formdraht rechteckigen Querschnittes 3 × 5 mm, also mit

$$q_D = 15 \text{ qmm},$$

so daß an Stelle von e' nun $e = 3 \cdot \frac{16{,}3}{15} = 3{,}26$ Volt im Anker verloren gehen, bei einem Ankerwiderstande $W_A = 0{,}0374$ Ohm. Dieser Formdraht habe als äußere Abmessungen mit Isolierung 4 × 6 mm.

Der Umfang des Ankereisens beträgt

$$24 \cdot \pi = 75{,}5 \text{ cm};$$

von Mitte bis Mitte Zahn gerechnet erhält man 75,5 : 48 = 1,58 cm, während zwei Drähte nebeneinanderliegend etwa 0,8 cm beanspruchen. Man kann daher die vier Drähte in der Nut so anordnen, daß zwei nebeneinander und zwei hochkant übereinander liegen, es bleiben dann abzüglich des Preßspanes von 1 mm Dicke noch 5,8 mm Dicke für den Zahnfuß übrig. Der äußere Durchmesser des Nutenankers beträgt nun bei 1 mm Preßspanzwischenlage zwischen zwei Spulen derselben Nut und bei 1 mm Eindrehung an den Bändern 27 cm.

Dem Magnetgestell soll eine Form zugrunde gelegt werden, die aus Fig. 288 zu erkennen ist, und deren hier interessierende Maße aus der folgenden Tabelle ersichtlich sind, die zugleich die Ausrechnung der Amperewindungszahlen nach den Kurven der Fig. 215 enthält:

Tabelle der Berechnung des magnetischen Kreises.

Bez.	Mat.	Querschn. qcm	Kraftl. d. Kreises	Dichte $\mathfrak{B}(\mathfrak{H})$	Weg cm	AW/cm $\mathfrak{Z}'$	AW f. d. Weg $\mathfrak{Z}'$
Anker	Schmied.	184	1840000	10000	24	3,75	90
Luftr.	Luft	338	1840000	5450	0,8	4350	3480
Pole	Stahlg.	120	1840000	15330	26	67	1740
Gestell	Stahlg.	132	1840000	13900	80	34	2720
						Summe	8030
						Für Streuung und Ankerrückwirkung	2670
							10700 Ampw.

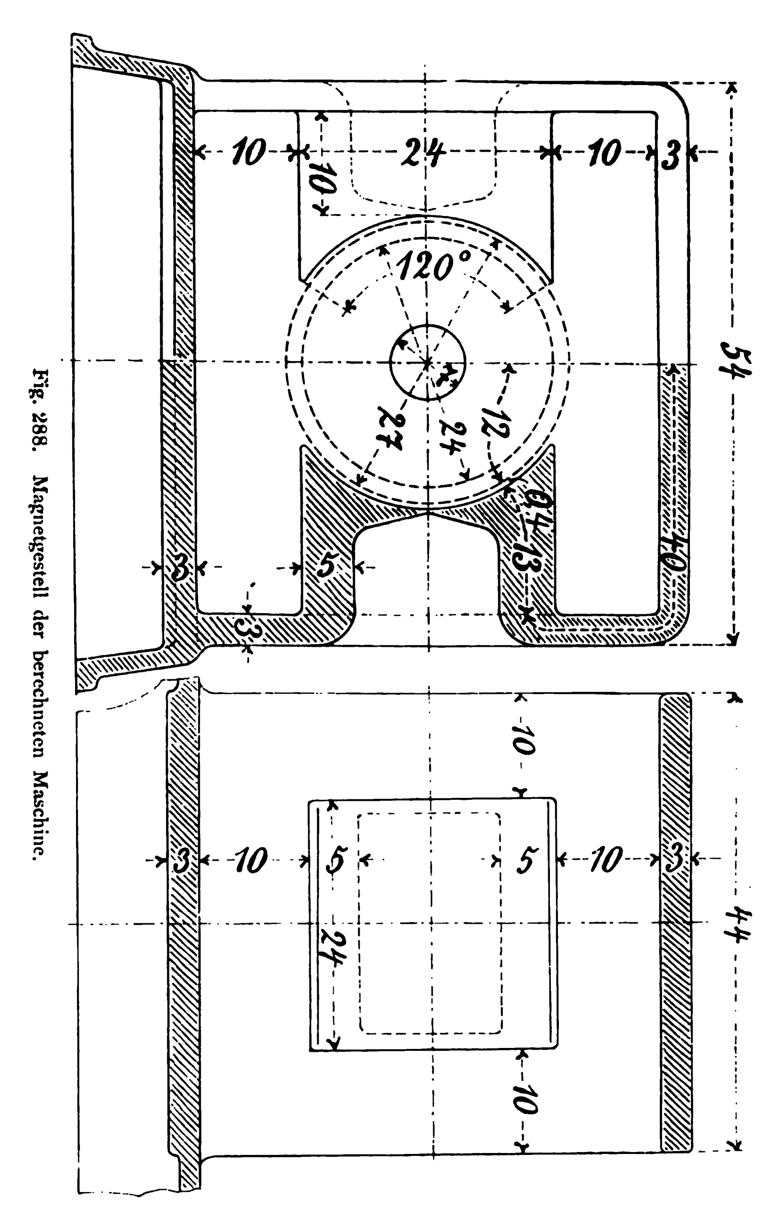


Fig. 288. Magnetgestell der berechneten Maschine.

Da die Wicklung auf zwei Polen untergebracht wird, erhält jede Spule 5350 Amperewindungen. Es war von vornherein geschätzt als Erregerstromstärke

$$i_M' = 2 \text{ Ampere},$$

demnach hätte jede Spule aus 2675 Windungen zu bestehen. Die mittlere Länge einer Windung beträgt nach dem am Gestell vorgesehenen Wicklungsraume 1,27 m. Es beträgt dann die Länge des Drahtes auf einer Magnetspule

$$l_M' = 1{,}27 \cdot 2675 = 3400 \text{ m.}$$

Die Spannung an den Enden einer Magnetspule beträgt für kurzgeschlossenen Nebenschlußregler die Hälfte der Klemmenspannung der Maschine

$$e_M = 60 \text{ Volt.}$$

Daraus ergibt sich der Querschnitt des Drahtes der Magnetspule für Kupfer von $c = 1:57$ zu

$$q_M' = \frac{l_M' \cdot i_M' \cdot c}{e_M} = \frac{3400 \cdot 2}{60 \cdot 57} = 1{,}99 \text{ qmm}$$

und der Durchmesser des Drahtes

$$d_M' = \sqrt{q_M' \cdot \frac{4}{\pi}} = 1{,}59 \text{ mm.}$$

Gewählt werde ein Draht von

$$d_M = 1{,}6 \text{ mm}$$

Kupferdurchmesser mit einem Kupferquerschnitt

$$q_M = 2{,}01 \text{ qmm}$$

und einem Außendurchmesser mit Isolierung von 2 mm. Von diesem Draht gehen auf einen Wicklungsquerschnitt von 90 × 90 mm in einer Schicht 44 Windungen, während 50 Schichten übereinander Platz haben, so daß sich auf die Spule 50 × 44 = 2200 Windungen ergeben. Eine Magnetspule besitzt demnach einen Widerstand

$$w_M = 2200 \cdot \frac{1{,}27}{2{,}01} \cdot \frac{1}{57} = 24{,}4 \text{ Ohm,}$$

so daß sich bei 60 Volt an einer Spule tatsächlich

$$i_M = \frac{60}{24} = 2{,}46 \text{ Ampere}$$

Erregerstrom und 2,46 · 2200 = 5412 Amperewindungen ergeben. Der Widerstand der ganzen Erregerwicklung beträgt $W_M = 48{,}4$ Ohm. Man kommt also mit dem geschätzten Gestell und den gemachten Annahmen näherungsweise aus. Bei wesentlichen Abweichungen würde nach entsprechenden Änderungen die Rechnung zu wiederholen sein.

Es ist bei dieser Berechnung noch nicht berücksichtigt, daß sich die Widerstände der Maschine durch Erwärmung vergrößern. Außerdem sind einige Werte schätzungsweise eingesetzt oder vernachlässigt, die nur nach erschöpfender Behandlung der Lehre von den Strom-

erzeugern hätten gerechnet werden können, so z. B. die zusätzlichen Amperewindungen der belasteten Maschine, der Einfluß der Ankerzähne usw.

Die ausgeführte Maschine würde daher nach dieser vereinfachten Berechnungsart voraussichtlich noch erhebliche Abweichungen gegenüber der Rechnung zeigen, jedoch lassen sich durch entsprechende Änderung der Umlaufszahl die gewünschten Verhältnisse in der Regel erreichen.

Die Bilanzgleichung für die gerechnete Maschine lautet (vgl. § 84, A):

$$L_1 = E'I + I_A^2 W_A + i_M^2 \cdot W_M + L_H + L_W + L_R$$

$$= 120 \cdot 85 + 87{,}46^2 \cdot 0{,}0374 + 2{,}46^2 \cdot 48{,}4$$

$$+ \frac{1}{6} \cdot \frac{(2{,}7^2 - 0{,}7^2)\pi}{4} \cdot 2{,}16 \cdot 17{,}33 \cdot 10000^{1,6} \cdot 10^{-6}$$

$$+ 2 \cdot \frac{(2{,}7^2 - 0{,}7^2)\pi}{4} \cdot 2{,}16 \cdot 17{,}33^2 \cdot 0{,}5^2 \cdot 10000^2 \cdot 10^{-10}$$

$$+ 0{,}03 \cdot 120 \cdot 85$$

$$= 10200 + 286 + 292 + 84 + 18 + 306 = 10200 + 986 \text{ Watt},$$

woraus zu sehen ist, daß auf 10200 Watt Nutzleistung 986 Watt Verlustleistung kommen. Der Wirkungsgrad beträgt demnach

$$\eta = \frac{10200}{10200 + 986} = 0{,}912.$$

Für die im Anker auftretende Verlustleistung von 286 + 84 + 18 = 388 Watt wird nach dem Grundsatz, daß auf 1 Watt Verlust 10 qcm abkühlende Oberfläche entfallen sollen, eine Oberfläche von 3880 qcm gefordert. Allein der äußere, roh gerechnete Zylindermantel des Ankers mit seiner Wicklung, die nach dem Vorbild der Fig. 272 mit 10 cm Überstand zu beiden Stirnseiten gedacht sein soll, hat

$$27 \cdot \pi \cdot 44 = 3400 \text{ qcm}$$

Oberfläche, so daß unter Berücksichtigung der übrigen der Luft zugängigen Flächen die obige Bedingung als erfüllt anzusehen ist.

Auf jede Magnetspule kommen

$$292 : 2 = 146 \text{ Watt};$$

der äußere Umfang der Spule beträgt roh gerechnet

$$4 \cdot 25 + 2 \cdot 9 \cdot \pi = 157 \text{ cm}$$

und ihre axiale Abmessung 9 cm, so daß allein an äußerer Spulenfläche

$$157 \times 9 = 1410 \text{ qcm}$$

vorhanden sind, während im ganzen für die Spule 1460 qcm zu verlangen sind. Unter Berücksichtigung der übrigen kühlenden Flächen ist die Erwärmungsbedingung der Magnetspulen also ebenfalls erfüllt.

Die Bürstenauflagefläche an jedem Pol ergibt sich nach dem Grundsatz, für Kohlebürsten auf 1 qcm maximal etwa 10 Ampere zuzulassen zu minimal 87,46 : 10 = 8,746 oder rund 9 qcm. Es seien auf eine Stromabnahmestelle 2 Kohlen zu je 2,5 × 3 cm Auflagefläche gewählt. Nimmt man einen Kollektordurchmesser von 18 cm an, so ergibt sich die Kollektorteilung zu $18 \cdot \pi : 48 = 1{,}178$ cm; davon mögen auf die Isolation 1 mm und auf den Kollektorstab 10,78 mm entfallen. Als wirksame Breite des Kollektors sollen 8 cm und als gesamte Breite 10 cm gelten.

Bei einer Kollektorstabhöhe von 4 cm beträgt das Gewicht eines Stabes rund 280 g, und die an ihm auftretende Fliehkraft bei 1250 Umgängen in der Minute, die als höchstzulässiger Fall gelten mögen, wird rund 38 kg. Der Kollektor muß demnach in axialer Richtung mit mehr als $48 \cdot \frac{38}{2} = 912$ kg (unter Voraussetzung eines Schwalbenschwanzes von 45°) zusammengepreßt sein, etwa mit der doppelten Kraft (1824 kg), woraus die spezifische Pressung im Isoliermaterial bei 11,4 cm mittlerem Durchmesser der tragenden Kegelfläche und bei 1 cm axialer (und radialer) Projektion der erzeugenden Geraden sich zu

$$\frac{1824\sqrt{2}}{11{,}4 \cdot \pi} = 72{,}2 \text{ kg/qcm}$$

berechnet.

Die Beanspruchung der Bänder ergibt sich auf folgende Weise: Eine Ankerspule besteht aus einem Leiter von 0,15 qcm Querschnitt und 264 cm Länge, also vom Kupfergewicht

$$0{,}15 \cdot 264 \cdot 8{,}9 = 352 \text{ g} \quad \text{oder} \quad 0{,}352 \text{ kg};$$

mit Isolation seien 0,37 kg gerechnet. Eine solche Spule ist bei einem mittleren Wicklungsradius von 12,75 cm und bei 1250 Umläufen in der Minute einer Fliehkraft von 83 kg ausgesetzt; 48 solcher Spulen verteilen sich auf den Umfang der Bänder von $27 \cdot \pi = 84{,}8$ cm, auf dessen Längeneinheit dadurch

$$\frac{83 \cdot 48}{84{,}8} = 47 \text{ kg/cm}$$

entfallen. Für die tangentiale Kraft in den Bändern kommt die Projektion aller dieser Kräfte/cm auf einen Durchmesser in Frage, so daß die Bänder in ihrem Gesamtquerschnitt

$$47 \cdot 27 = 1269 \text{ kg}$$

unter Vernachlässigung von Drahtsteifigkeit und Pressung an den Nutenwänden auszuhalten haben. Verteilt sich die Fliehkraft auf 4 Bänder (8 Querschnitte), so hat ein Querschnitt einen Zug von 159 kg aufzunehmen; dieser Zug kommt zu demjenigen hinzu, der den Bändern beim Aufwickeln gegeben wird, und der zur Vermeidung wesentlicher

Formänderungen zwischen stillstehendem und laufendem Anker nicht zu gering sein darf. Für Klaviersaitenstahldraht, der bei 10000 kg/qcm zerreißt, würden bei vierfacher Sicherheit und bei Annahme des doppelten Zuges gegen den gerechneten etwa 14 qmm auf ein Band, also etwa 28 Umgänge eines Drahtes von 0,8 mm Durchmesser in Frage kommen, während beim Aufwickeln mit etwa 6 bis 7 kg an dem Draht zu ziehen ist.

Auf dem Anker der gerechneten Maschine liegen $48 \cdot 0{,}352 = 16{,}9$ kg Kupfer, auf den Magnetspulen $2 \cdot 2200 \cdot 1{,}27_m \cdot 2{,}01_{qmm} \cdot 8{,}9 = 101064$ g oder rund 101 kg Kupfer, ein Wert, der durch die ungünstige Form der Pole (vgl. § 85, A) so hoch wird. Für einen Kupferpreis von 2 M/kg und einen Preis des Ankerbleches von 0,35 M/kg sind einige besonders interessierende Materialpreise an dieser Maschine:

für das	Ankerkupfer . .	34 M
„ „	Ankereisen. . .	31 „
„ „	Magnetsp.-Kupfer	202 „
„ „	Kollektorkupfer .	27 „

Eine genauere Vorausberechnung des Verhaltens einer Maschine wird vorgenommen unter Annahme einer Reihe verschiedener, das Gestell und den Anker durchsetzender Kraftlinienzahlen. Es lassen sich dann die zugehörigen Amperewindungszahlen und Stromstärken des Nebenschlusses ausrechnen, so daß auch die Leerlaufcharakteristik für eine bestimmte Umlaufszahl im voraus bestimmt werden kann. Eine darauf folgende Vorausberechnung einer Schar von Kurven der elektromotorischen Kräfte in Abhängigkeit vom Ankerstrome für verschiedene Widerstände des Nebenschlußkreises und bestimmte Umlaufszahl kann nur vorgenommen werden, wenn für die Ankerrückwirkung bestimmte Annahmen gemacht werden. Die zugehörige Schar von Klemmenspannungskurven (äußeren Charakteristiken) ist daraufhin durch Abzug der Ankerverlustspannungen zu ermitteln. Die Größe und Abstufung des Nebenschlußvorschaltwiderstandes zur Aufrechthaltung der Klemmenspannung zwischen bestimmten Grenzen ergibt sich durch Herausgreifen eines wagerechten Streifens aus dieser letzteren Kurvenschar.

§ 85. Ausführungsfragen.

A. Allgemeines.

Für das Magnetgestell, wie in vielen Fällen für das Gestell der ganzen Maschine überhaupt, kommt gegenwärtig fast nur ein weiches Stahlgußmaterial (Dynamostahl) in Frage, da Graugußmaschinen zu schwer ausfallen und hohe Transportkosten verursachen.

Entgegen der Gepflogenheit im übrigen Maschinenbau werden an den Trennstellen des Eisens, da wo ein Kraftfluß hindurchgehen soll, nicht Arbeitsleisten, sondern zusammenhängende Arbeitsflächen angebracht; es wird Berührung in ganzer Fläche verlangt, da sonst Lufträume im magnetischen Kreise an falscher Stelle auftreten würden.

In bezug auf die Anordnung der Magnetspulen ist nach dem Beispiel des vorigen Paragraphen der Hang zur Sparsamkeit mit dem Spulenkupfer verständlich. Daher ist es erstens allgemein üblich bei neueren Maschinen den Kraftfluß zweier räumlich nebeneinanderliegender magnetischer Kreise mit einer Spule zu umgeben, so wie das auch in dem Beispiel von § 84 geschehen ist. Ein Sparen etwa gegenüber der Manchestertype liegt dadurch schon vor nach dem Grundsatz, daß der Umfang ähnlicher Figuren in geringerem Maße zunimmt, als die umfahrene Fläche. Zweitens: Da das Verhältnis von Umfang zu Fläche beim Kreis am kleinsten ist, ergeben zylindrische Spulenkerne mit zylindrischen Spulen geringere Kupferkosten als viereckige. Drittens: Vor allem sind, um zu billigen Magnetspulen zu kommen, keine Hohlräume mit Spulen zu umgeben, wie das in dem gerechneten Beispiel vorliegt. Im Gegenteil ist der Kraftfluß innerhalb der Magnetspule so eng zusammenzuschnüren, wie es eben geht. Die Verwendung runder schmiedeeiserner hochgesättigter Spulenkerne, die zwei benachbarte magnetische Kreise zusammenfassen, angesetzt an einen Stahlgußrahmen und versehen mit Polschuhen aus Gußmaterial liefert nach dieser Richtung hin günstige Ergebnisse.

Zur Lagerung des Ankers ist es üblich, Ringschmierlager zu verwenden, wobei die Lagerschalen, vor allem bei kleineren Maschinen, sich nach der Achse einstellen können. Der Welle gibt man so viel Spiel, gewöhnlich mehrere Millimeter, daß sie sich nach dem Zug der Kraftlinien einstellt, ohne daß Lagerbunde anliegen. Die Verhältnisse sind hierfür günstig, wenn Ankereisen und Polschuh die gleiche Breite haben. Es sind bei dieser Art der Lagerung die Reibungsverluste am geringsten, das Öl verteilt sich im Lager am besten, und der Kollektor erhält keine Rillen, da die Welle sich während des Betriebes fortwährend um kleine Beträge hin- und herbewegen kann.

In den Ringschmierlagern sind gesprengte Schmierringe zu vermeiden; ein gesprengter Ring würde infolge des schnellen Umlaufes an der Sprengstelle leicht so erhebliche Stöße bekommen, daß das ruhige Arbeiten dadurch beeinträchtigt wird. Eiserne Schmierringe zu verwenden empfiehlt sich gleichfalls nicht, da sie sich bei magnetisch werdender Welle festsetzen könnten.

Auf der Welle neben den Lagerflächen sitzende Schleuderringe treiben herausgelangendes Öl durch Fliehkraft in die äußere Lagerumhüllung hinein und halten so die Maschine ölrein.

Außer den Ringschmierlagern kommen auch Kugellager in Betracht, die geringere Leerlaufsverluste und geringeren Schmiermittelbedarf aufweisen.

Durch Riemen oder Seile angetriebene Maschinen stellt man auf Schienen, die durch Anziehen von Gewindebolzen ein Nachspannen des Zugmittels ermöglichen, indem man die Maschine auf dem Spannschlitten verschiebt. Zur Befestigung der Maschine auf diesem Schlitten empfiehlt es sich, in den Schienen gegen Drehung gesicherte Muttern

verschiebbar anzubringen, in die von oben durch die Fundamentaugen geführte Klopfbolzen eingeschraubt werden. Diese Anordnung macht ein Anheben der Maschine bei der Aufstellung unnötig.

Ob Maschinen für Umlaufssinn in beiden Richtungen verwendet werden können, entscheidet sich darnach, ob Besonderheiten zugunsten der Stromwendung an der Ankerwicklung oder an den Polschuhen vorhanden sind, ob zur Kühlung besondere Windführungseinrichtungen an den Maschinen vorhanden sind, und ob die Form der Ölkanäle in den Lagerschalen beiderseitigen Umlauf gestattet; schließlich ist noch von Bedeutung, ob die Bürstenbrücke zur Umkehr des Umlaufssinnes in die erforderliche neue Stellung gebracht werden kann.

Auf die Isolierung erstrecken sich folgende Angaben: Preßspan wird vor der Verwendung im Dynamobau vielfach mit 100 bis 110 Grad in Leinöl gekocht, wodurch alle Feuchtigkeit entweicht und die Durchschlagsspannung bedeutend höher gelegt wird. Mikanit kann nur im warmen Zustande gebogen werden.

Die Spulenhülsen der Magnetwicklungen werden aus Zinkblech hergestellt und mit vielen Schichten von Isoliermaterial und Kleblackzwischenlagen ausgefüttert, wobei die Stoßstellen zueinander versetzt sind. Die innerste Windung wird normalerweise durch einen Kupferblechstreifen angeschlossen, der mit dem Drahtende verlötet und durch eine starke und gute Isolierschicht vom Wicklungsraume getrennt ist. Die Ausfütterung steht zweckmäßig über den Zinkrand der Spulenhülse beträchtlich über, so daß ein genügender Kriechweg zustande kommt. Auch dort, wo der eben erwähnte Kupferstreifen zum Vorschein kommt, ist in diesem Sinne gegen die Wicklung zu verfahren. Über jede Schicht der Magnetwicklung legt man zweckmäßig einen sich am Rande eben leicht umschlagenden Streifen von Isolierpapier. Eine Nebenschlußwicklung wird häufig nach außen durch eine Schnurschicht geschützt.

Fertig gewickelte Anker und Magnetspulen werden in einem Vakuumtrockenapparat von aller anhaftenden Feuchtigkeit befreit und dann mit Isolierlack getränkt. Der Isolierlack wird durch Schutzlack von großer mechanischer Festigkeit gegen mechanische Beschädigungen gesichert.

B. Zweipolige Maschinen.

In früherer Zeit gingen die konstruktionellen Ausführungen weiter auseinander, als gegenwärtig. Die meisten Firmen haben den mehr oder weniger veränderten Lahmeyertypus angenommen. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in der gleichmäßigen Kraftlinienverteilung zu beiden Seiten. Die häufigst vorkommende Form des Magnetgestelles ist im wesentlichen durch Fig. 289 angedeutet. Sie zeigt einen zylindrisch zu denkenden angegossenen Pol mit angesetztem Polschuh.

Die Aneinandergliederung der einzelnen Stücke erfolgt am besten durch Trennstellen, die Teile von Zylinderflächen sind.

Die Stücke werden unter dieser Voraussetzung nach genauem

Maß auf der Drehbank bearbeitet und zentrieren sich daher beim Ansetzen ohne weiteres.

Die Polschuhe lassen sich an einem Gestell nach Fig. 289 zentrisch ansetzen. Bei zentrisch angesetzten Polen hingegen würde der Drehstahl an den seitlichen Teilen des Magnetgestelles nach Fig. 289 nicht vorbeigelangen können. Wollte man bei angesetzten Polen diesen Grundsatz festhalten, so würde das bei rechteckigen Rahmen Spezialbearbeitungsmaschinen erfordern. Die Verwendung runder Rahmen hat sich auch bei zweipoligen Maschinen eingebürgert, wobei dann meistens zu beiden Stirnseiten der Maschine Lagerschilde zu finden sind.

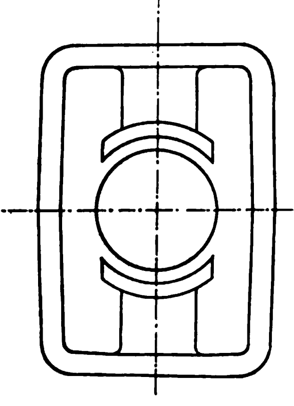


Fig. 289. Normales Magnetgestell.

Auch die Lager, Lagerböcke und Lagerschilde werden, um die mühelose Zentrierung vollständig zu machen, zentrisch angesetzt. Häufig findet man die Polbohrung von gleichem Maß, wie die Bohrung für die aufgesetzten Lager, so daß mehrere Maschinen auf dasselbe Bett gespannt und mit umlaufendem Stahl in einem durchgebohrt werden können.

Sind Zylinderflächen mehrerer Durchmesser an einem Gestell anzubringen, wie das z. B. bei Anwendung von Lagerschilden erforderlich ist, so erfolgt die Bearbeitung aller dieser Stellen am besten, ohne daß dazwischen das Gestell umgespannt wird.

Außer den Fragen des Aufbaues der Maschine ist auch die Frage der Bequemlichkeit des Auswechselns von Anker und Magnetspulen von Bedeutung für die modernen Typen. Maschinen, deren Anker nicht nach Wegnahme eines Lagerbockes oder Lagerschildes, sondern erst nach Abheben von Teilen des Magnetgestelles herausgenommen werden kann, sind kaum mehr zu finden.

Fig. 290 zeigt eine Maschine der Siemens-Schuckertwerke, deren Magnetgestell nach der Grundform der Fig. 289 angeordnet ist. Sie besitzt einen Anker mit Schablonenwicklung nach Anordnungsweise der Fig. 272. Die Klemmen dieser Maschine zeigen eine gegen die normale Ausführung der Firma veränderte Form. Eine Besonderheit der Maschinen dieser Bauart bilden die schrägen Polschuhe, die an der Fig. 291 erkennbar sind. Sie haben auf ein bei Nutenankern leicht vorkommendes stoßweise erfolgendes Abreißen der Kraftlinien ausgleichende Wirkung und begünstigen dadurch auch die Stromwendung.

Die Lagerböcke dieser Maschinen sind an ihren Befestigungsstellen durch eine in Richtung der Achse nur wenige Millimeter betragende Zylinderfläche zentriert.

Fig. 291 läßt am unteren Teil des vorderen Lagerbockes eine Stelle erkennen, an der ein Apparat zum Abdrehen des Kollektors befestigt werden kann.



Fig. 290. (Siemens-Schuckertwerke.)

Spulenkern und Polschuh besteht bei der Maschine nach Fig. 291 aus einem Stück, das durch einen schwachkonischen Ansatz von angenähert Kerndurchmesser in dem Gestellrahmen befestigt und durch Schrauben gesichert wird.



Fig. 291.

C. Mehrpolige Maschinen.

Auch bei mehrpoligen Maschinen herrscht der Grundsatz, die Magnetspulen auf den Polen anzuordnen, so daß in jeder Spule zwei magnetische Kreise vereinigt werden. Das rahmenförmige runde oder vieleckige Gestell erhält zu dem Zweck zentrisch angesetzte Pole oder Polschuhe. Für kleinere Maschinen kommen meistens Lagerschilde in Betracht, für größere auf den Fundamentrahmen aufgesetzte Lagerböcke. Den Anker ohne Abnahme von Magnetgestellteilen herausnehmbar zu machen, ist für größere Maschinen gegenstandslos, da die Teile in jedem Fall mit einem Kran angefaßt werden müssen.

Das Ankereisen großer Maschinen kann nicht mehr aus ganzen

Blechringen zusammengesetzt werden. Man schneidet daher Sektoren aus, die mit (etwa nach Art eines Läuferverbandes am Ziegelmauerwerk) abwechselnden Stoßstellen auf Bolzen aufgereiht werden und so mit Hilfe der Bolzen ein der Fliehkraft und dem magnetischen Zug widerstehendes Gefüge bilden. Die Bolzen sind isoliert einzusetzen, damit Induktionsströme durch Bolzen und Ankerkörper nicht zustande kommen können.

Bei großen Maschinen sind die Kollektoren so konstruiert, daß bei dem Lockerwerden einer Lamelle nicht der ganze Kollektor gelöst zu werden braucht. Man klemmt vielmehr eine Anzahl nebeneinander liegender Segmente unter Anwendung von Bolzen oder Stiftschrauben durch Keilwirkung fest. Bei einer Ausbesserung braucht dann nur der Teil des Kollektors gelöst zu werden, in dem sich der Fehler befindet.

Fig. 292 veranschaulicht eine Maschine der Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe. Sie läßt die mechanische Anordnungsweise

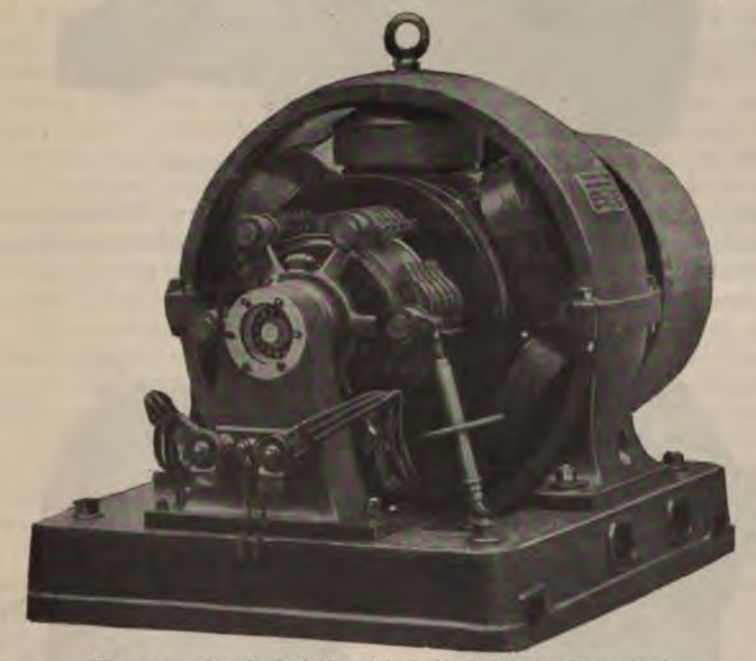


Fig. 292. (Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe.)

in allem deutlich erkennen. Die Schutzkappe des vorn sichtbaren Kugellagers ist abgenommen. Die Bürstenbrücke dreht sich auf einem Ansatz des Lagerbockes. Ein Bürstensatz besteht aus 5 Kohlebürsten. Die an der Bürstenbrücke angebrachten Verbindungen der gleichnamigen elektrischen Pole sind aus Rundkupfer hergestellt. Die Bürsten-

verstellung wird durch ein Handrad unter Vermittelung einer Schraubenspindel vorgenommen.

Die in Fig. 293 dargestellte Maschine der Elektromotorenwerke Heidenau zeigt eine bei größeren Maschinen beliebte, im wesentlichen



Fig. 293. (Elektromotorenwerke Heidenau.)

reifenförmige Anordnung des Bürstenträgers. Der ebenfalls durch Handrad einstellbare Bürstenring wird durch vom Magnetgestell ausgehende Arme geführt.



Fig. 294. (Ernst Heinrich Geist.) Fig. 295.

Die Figg. 294 und 295 geben Beispiele von Maschinen mit Lagerschilden, die für kleinere Typen bevorzugt werden. Lagerschilde mit

4 oder 8 usw. Schrauben gestatten die* Möglichkeit die Maschine, auch wenn sie mit Ringschmierung versehen ist, an Wänden oder Decken anzubringen, indem dann der Lagerschild entsprechend gedreht wird. Eine Drehung des Schildes ist bei Kugellagern (Fig. 294) nicht erforderlich, falls nicht die mechanische Beanspruchung dadurch ungünstig wird. Die Maschinen Figg. 294 und 295 sind Wendepolmaschinen. Um die Anordnung der Wendepole zu zeigen, ist in Fig. 295 der vordere Lagerschild abgenommen.

D. Ungünstige Erfahrungen und ihre Abhilfe.

Die folgenden Angaben haben zum größten Teil historische Bedeutung. Sie sollen bezwecken auf einige ungünstige Erfahrungen hinzuweisen und zu zeigen, wie den auftretenden Übelständen abgeholfen werden kann. Für ältere Anordnungen erklärt sich dadurch das gänzliche Verschwinden besonderer Typen und Herstellungsverfahren, so daß dadurch das gegenwärtig Vorhandene besser zu verstehen ist.

Gramme[Hist. 48]) wickelte das Ankereisen aus Draht auf, versah es mit Ankerspulen, so daß ein Ring entstand, und klemmte diesen Ring nach der Bewicklung mit Holzkörpern auf der Welle fest. Die Polschuhe umfingen den Ring außen und zu beiden Stirnseiten. Die Anordnung hatte den Nachteil, daß das aufgewickelte Ankereisen nicht genau rund wurde, daß durch die Befestigungsweise des Ankers die Isolierung der Drähte durchgedrückt wurde, und daß durch die Form der Polschuhe magnetische Zugkräfte in Richtung der Achse auftraten, die auf die Befestigung des Ankers und auf die Lagerung der Welle ungünstigen Einfluß ausübten; es gibt nur eine scharf einzurichtende Stellung, in der die Resultierende der magnetischen Kräfte gleich Null ist; der Anker befindet sich in dieser Stellung in labilem Gleichgewicht.

In erhöhtem Maße zeigte den Übelstand der in Richtung der Achse auftretenden Kräfte der von Schuckert[Hist. 58]) herrührende Flachringanker. Das Ankereisen wurde durch Aufwickeln eines Eisenbandes zwischen gabelförmig gestalteten Enden eines Armsternes hergestellt, so daß es eine im wesentlichen scheibenförmige Gestalt annahm. Die das Eisen haltenden Stege waren nicht imstande, dauernd den Anker sicher festzuhalten, ebenfalls wegen des labilen und durch eine geringe seitliche Ausweichung empfindlich gestörten Gleichgewichtes.

Edison[Hist. 51]) glaubte den Magnetschenkeln ein möglichst großes magnetisches Moment geben zu müssen. Das Magnetgestell seiner Maschinen glich zwei langen Säulen, die viel Kupfer brauchten. John Hopkinson erkannte die Unrichtigkeit dieser Auffassung und schuf die jetzt übliche Berechnungsweise magnetischer Kreise, sowie die verbesserte Edisontype Fig. 240.

Hufeisenmaschinen, zu denen auch die Edisontype gehört, haben den Nachteil, daß auch bei unbelasteter Maschine bei konzentrisch in der Polbohrung sitzendem Anker der Kraftfluß ungleichmäßig über den

---

* Besonders für Motoren in Frage kommende.

Polbogen verteilt ist. Der magnetische Widerstand der an der Innenseite des Hufeisens liegenden Teile ist geringer als derjenige der äußeren Teile, daher stellt sich das Feld nach innen zu stärker ein, als nach außen. Diese Verteilung des Kraftflusses führt zu einseitig auf den Anker wirkenden magnetischen Zugkräften, zu Vergrößerung der Lagerreibung und zu erheblicher Mehrbeanspruchung der Ankerwelle auf Biegung, sowie zu einer ungleichmäßigen Induktionsspannung, je nach der Stelle, wo sich die betreffende Ankerspule gerade befindet. Eine Durchbiegung der Ankerwelle führt leicht zu Brüchen der Verbindungsdrähte zwischen Anker und Kollektor, da der Draht je nach seiner Stellung das eine Mal auf Zug, das andere Mal auf Druck (Knick) beansprucht ist. Die ungleichmäßige Induktionsspannung der Ankerspulen hat zur Folge, daß die Bürsten in verschiedenen Stadien der Belastung einen von 180 Grad mehr oder weniger abweichenden Winkel bekommen müssen, was praktisch zu Schwierigkeiten führt, so daß man am liebsten jede Bürste einzeln einstellbar machen möchte.

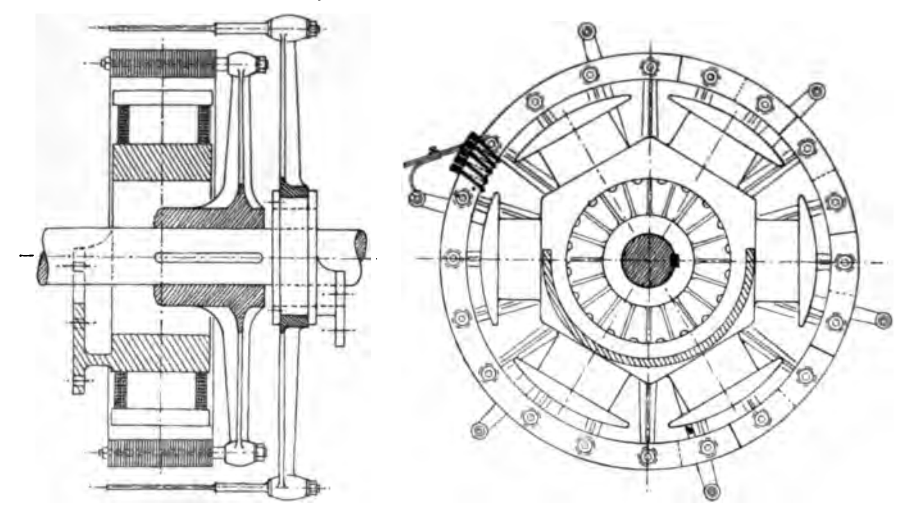


Fig. 296. Innenpolmaschine.

Man vermeidet die erwähnten Nachteile, so gut es geht, indem man den Anker etwas exzentrisch nach außen setzt, wodurch der geringe Eisenwiderstand des magnetischen Kreises mit einem größeren Luftwiderstande und der größere Eisenwiderstand mit einem geringeren Luftwiderstand hintereinandergeschaltet wird. Die Verbindungsdrähte zwischen Anker nnd Kollektor schützt man, indem man sie schraubenlinig führt, wobei der Anker gegen den Kollektor um einen beträchtlichen Winkel verschoben wird.

Eine spezielle Form der mehrpoligen Maschinen bilden die Siemensschen Innenpolmaschinen. Man hat einen festen Kranz von Magneten

innerhalb des Ringankers, so wie es die Fig. 296 für eine sechspolige Maschine veranschaulicht. Hierbei schleifen die Bürsten auf der Außenseite des Ankers, die zum Kollektor ausgebildet ist.

Der Ringanker muß bei dieser Konstruktion an einem Armstern aus Stahlguß befestigt werden, der an dem Anker seitlich angreift. Auf die Konstruktion des Armsternes in Verbindung mit dem Ankereisen wird besonderer Wert gelegt, da das Ganze ein leicht verschiebliches Gebilde ist und dabei den großen Zug der Kraftlinien auszuhalten hat.

Die Beanspruchung des Ankers durch den magnetischen Zug bildet einen ungünstigen Fall, indem ein runder Körper durch radial nach innen wirkende Kräfte beansprucht wird, etwa wie bei den Flammrohren der Kessel, die deshalb besondere Versteifung brauchen. Die vom Armstern aus durch das Ankereisen gehenden Stäbe halten die aus einzelnen Teilen bestehenden Ankerbleche zusammen. Die Bürstenbrücke wird bei dieser Konstruktion sehr groß. Sie ist auf einer Zylinderfläche drehbar, die an dem in der Seitenansicht rechts liegenden Lagerbock festgeschraubt ist. Das feststehende Magnetgestell ist an dem gegenüberliegenden Lagerbock angebracht.

§ 86. Behandlungsfragen.

Außer den selbstverständlichen Vorschriften der Ordnung, der Sauberkeit und der zuverlässigen Wartung in bezug auf den mechanischen Teil kommen für Gleichstrommaschinen folgende Punkte hinzu:

Der Kollektor und die Bürsten bedürfen als die empfindlichsten Teile besonderer Wartung. Das Wesentliche hierüber ist in früheren Gebieten (§§ 77, 78 und 82) verstreut enthalten. Es läßt sich zusammenfassen in den Satz: Das Feuern muß möglichst gering gehalten werden. Bei Maschinen, die eine Nachstellung der Bürsten erfordern, hat die Nachstellung sorgfältig zu erfolgen. Eine Vorbedingung für das gute Arbeiten der Maschine bildet, daß der Kollektor mechanisch gut in Ordnung ist. Das Abschleifen des Kollektors mit von Hand angefaßtem Glas- oder Schmirgelpapier ist zu vermeiden. Man bedient sich zum Abschleifen der Schleifklötze, die genau entsprechend der Rundung des Kollektors hergestellt werden. Man legt das Papier mit der glatten Seite in die Rundung des Schleifklotzes, ohne daß ein Polstermittel dazwischen kommt, und preßt das Papier mit der rauhen Seite durch den Klotz gegen den Kollektor. Der Klotz ist hierbei nicht zu kanten. Das Verfahren bezweckt hervorstehende Teile allein wegzunehmen, was sich sowohl auf das Kupfer als auch auf die Glimmerzwischenlagen bezieht.

Der Anker und der Kollektor, sowie sämtliche isolierende Teile sind frei von Kupfer- oder Kohlestaub zu halten. Beim Abschleifen verwendet man Staubfänger, die in Form von weichem Filz hinter dem Schleifklotz angebracht werden. Zieht sich die Kohle der Bürsten um den Kollektor, so ist sie zu weich, oder die Bürsten haben Öl

bekommen. Auch der festsitzende Kohlestaub dieser Art ist zu beseitigen, da er zu Schlüssen von Lamelle zu Lamelle Veranlassung gibt. Scheinbar sich um den Kollektor der laufenden Maschine ziehende Funken sind das Anzeichen einer solchen Verschmutzung.

Das Abschleifen darf nicht an der unter Spannung stehenden Maschine erfolgen. Übermäßiges Schleifen ist zu vermeiden; an seine Stelle tritt besser ein Abdrehen. Beim Abschleifen des Kollektors sind die Bürsten abzuheben.

Während des Betriebes kann eine Bürste im Notfalle, etwa zwecks Einsetzung einer provisorisch angebrachten Kohle oder zur Prüfung des Auflagedruckes, nur unter der Voraussetzung abgehoben werden, daß mehrere Bürsten auf einem Stift aufgereiht sind.

Nässe und Feuchtigkeit sind von den Wicklungen der Maschinen peinlich fernzuhalten, daher kommen als Räume für die Aufstellung von Maschinen möglichst trockene Räume in Frage. Sollten Wicklungen feucht geworden sein, so kann bisweilen durch vorsichtig angewandte Stromwärme Abhilfe geschaffen werden. Durch den Betrieb schützen sich die Wicklungen selbst gegen mäßige Luftfeuchtigkeit.

Versagt die Selbsterregung einer Maschine, so können dafür folgende Gründe vorliegen:

a) Ohne vorherige Betriebsänderung:

1. Es kann eine Unterbrechung im Erregerkreise vorliegen. Um sie aufzufinden sind alle vom Erregerstrom durchflossenen Teile (vgl. Fig. 251) zu untersuchen: Maschinenklemme 1, Maschinenleitung, Abzweig zu 1′, Reglerspiralen und -kontakte, Reglerkurbel, Klemme 2′, Leitung zu Klemme 2 der Maschine, Verbindungen von Klemme 2 zu der Magnetspule, Verbindungen der Magnetspulen untereinander, Verbindung mit Klemme 3 der Maschine, sowie die Bürstenkabel und die Bürsten.
2. Es kann sich ein Nebenschluß zu der Erregerwicklung gebildet haben, der ihr zu viel Strom entzieht. Der Fall liegt am häufigsten vor durch Verschmutzung des Kollektors, da der Strom von einer Bürste zu der anderen über den verschmutzten Kollektor einen geringeren Widerstand vorfindet, als durch die Wicklung. Hier ist durch Reinigen des Kollektors mit Benzin oder Terpentin, im Notfall durch Abschleifen Hilfe zu schaffen. Der Fall kann außerdem vorliegen durch eine Verbindung zwischen Anfang und Ende der Erregerwicklung, wie sie bei Spulendurchschlag entsteht, falls die Erregerleitung plötzlich unterbrochen wird.
3. Die Bürsten können falsch, nahezu in der Mitte zwischen den richtigen Auflagestellen stehen. In diesem Fall entwickelt sich keine oder keine genügende Spannung.

b) An einer neu aufgestellten Maschine, vorausgesetzt, daß das Schema nach Fig. 251 richtig hergestellt und die unter a) bezeichneten Fehler nicht vorliegen:

1. Der erzeugte Induktionsstrom arbeitet dem remanenten Magnetismus entgegen (Abhilfe s. w. u.).
2. Die Maschine hat zu geringe Umlaufszahl.
3. Das Gestell der Maschine hat keinen genügenden remanenten Magnetismus. Um ihn hervorzurufen, ist von Akkumulatoren aus nach dem Schema Fig. 203 zu verfahren;* bisweilen helfen mehrere hintereinandergeschaltete primäre Elemente. Der Anker ist durch Abheben der Bürsten oder Lösen der Bürstenkabel von den Maschinenklemmen auszuschalten, ehe die Batterie angelegt wird.

Bei Neuaufstellung einer Maschine sind folgende Grundsätze zu beachten:

Eine Maschine erregt sich bei der richtigen zur Schaltung der Maschine gehörigen Drehrichtung unabhängig von der Richtung des remanenten Magnetismus.

Erregt sich eine Maschine, zeigt sie aber das Umgekehrte der gewünschten elektrischen Polarität bei einem bestimmten gewünschten Drehsinn, so ist sie nur umzumagnetisieren, während die Verbindungen zwischen Anker und Magnetwicklung unverändert bleiben.

Arbeitet der Induktionsstrom dem remanenten Magnetismus entgegen bei einem bestimmten gewünschten Umlaufsinn, so ist eine Kommutation zwischen Anker und Magnetwicklung vorzunehmen. Bei Nebenschlußmaschinen ist es ratsam, zu diesem Zweck die vom Anker kommenden Kabel an den Hauptklemmen der Maschine (Klemmen 1 und 3 der Fig. 251) zu lösen und zu vertauschen. An den Drähten der Magnetwicklung etwas zu ändern, empfiehlt sich nicht.

Soll bei umgekehrtem Umlaufsinn** einer Nebenschlußmaschine diejenige Maschinenklemme positiv werden, die vor der Umkehrung positiv war, so sind nur die Verbindungen zwischen den Ankerpolen und Hauptklemmen der Maschine zu vertauschen, während die Richtung des remanenten Magnetismus bestehen bleibt; bei dazukommender Umkehr des remanenten Magnetismus würde man Ankerpole gleichen Vorzeichens erhalten.

Bei Maschinen mit Wendepolen ist zwischen Anker und Wendepolwicklung keine Umschaltung vorzunehmen. Setzt man für beide unzertrennlich gedachte Wicklungen das Wort Anker, so gilt für Wendepolmaschinen jeder der unter dem letzten Strich angeführten Sätze, falls die Nebenschlußwicklung von den Klemmen der Maschine (nicht etwa von den Bürsten) abzweigt.

---

* Vgl. § 67, 11. Versuch.

** Ob das möglich ist, s. u. § 85, A.

§ 87. Anforderungen und Maschinennormalien.

Die allgemeinen Anforderungen, die die höher entwickelte Praxis an elektrische Maschinen stellt, lassen sich wie folgt zusammenfassen: Es sollen die Maschinen ihre Aufgabe mit einem möglichst niedrigen Aufwand von Gesamtkosten erfüllen. Außer den Anforderungen der Billigkeit in der Anschaffung und der langen Gebrauchsfähigkeit gehören dazu folgende Anforderungen:

1. Funkenloser Gang in jeder vorkommenden Belastung.
2. Keine Bürstenverstellung bei normaler Belastung.
3. Möglichkeit zeitweiliger Überlastung.
4. Geringe Wartungsbedürftigkeit.
5. Geringe Ausbesserungsbedürftigkeit.
6. Mäßig guter Wirkungsgrad (vgl. § 82 F, Ende).

Unerfüllbar ist die Anforderung geringer Umlaufszahlen des Ankers bei Anwendung mäßig kleiner Maschinen, wenn eine bestimmte Leistung erzielt werden soll. Für langsamen Gang werden die Typen groß und teuer.

Im besonderen hat der Verband deutscher Elektrotechniker unter dem Namen „Normalien für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren" Bestimmungen erlassen, aus denen im folgenden einiges wiedergegeben ist.

Maschinen ohne Leistungsschild oder mit einem anderen, als dem weiter unten angegebenen Leistungsschild, werden als den Normalien nicht entsprechend angesehen. Als Leistung gilt die abgegebene, die in KW auf dem Leistungsschild auszudrücken ist. Außerdem sind auf dem Leistungsschild anzugeben die normalen Werte von Umlaufszahl, Spannung und Stromstärke.

In bezug auf die Leistung sind folgende Betriebsarten zu unterscheiden.

a) Der intermittierende Betrieb, bei dem nach Minuten zählende Arbeitsperioden und Ruhepausen abwechseln.*
b) Der kurzzeitige Betrieb, bei dem die Arbeitsperiode kürzer ist als nötig, um die Endtemperatur zu erreichen, und die Ruhepause lang genug, damit die Temperatur wieder annähernd auf die Lufttemperatur sinken kann.
c) Der Dauerbetrieb, bei dem die Arbeitsperiode so lang ist, daß die Endtemperatur erreicht wird.

Als normale Leistung für intermittierende Betriebe ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche ohne Unterbrechung eine Stunde lang abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig bezeichneten Wert überschreitet. Diese Leistung ist auf einem Schild unter der Bezeichnung „intermittierend" anzugeben.

Als normale Leistung für kurzzeitigen Betrieb ist die Leistung zu

* Bezieht sich im wesentlichen auf Motoren.

verstehen und anzugeben, welche während einer vereinbarten Betriebszeit abgegeben werden kann, ohne daß die Temperatur den weiter unten als zulässig bezeichneten Wert überschreitet. Diese Leistung ist unter der Bezeichnung „für . . . St." auf einem Schild anzugeben.

Als normale Leistung für Dauerbetrieb ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche während beliebig langer Zeit abgegeben werden kann, ohne daß die Temperatur den weiter unten als zulässig angegebenen Wert überschreitet. Diese Leistung ist auf einem Schild unter der Bezeichnung „dauernd" anzugeben. Die Maschinen müssen bei jeder Belastung innerhalb der zulässigen Grenzen bei günstigster Bürstenstellung und eingelaufenen Bürsten so weit funkenfrei laufen, daß ein Behandeln des Kollektors mit Glaspapier oder dgl. höchstens nach je 24 Betriebsstunden erforderlich ist.

Die Temperaturzunahme ist bei normaler Leistung und unter Berücksichtigung der oben definierten Betriebsarten zu messen, nämlich: bei intermittierendem Betrieb nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes von einer Stunde; bei kurzzeitigem Betrieb nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes während der auf dem Leistungsschild verzeichneten Betriebszeit; bei Dauerbetrieben nach Ablauf von 10 Stunden; sofern für kleinere Maschinen unzweifelhaft feststeht, daß die stationäre Temperatur in weniger als 10 Stunden erreicht wird, so kann die Temperaturzunahme nach entsprechend kürzerer Zeit gemessen werden.

Als Lufttemperatur gilt jene der zuströmenden Luft oder, wenn keine entschiedene Luftströmung bemerkbar ist, die mittlere Temperatur der die Maschine umgebenden Luft in Höhe der Maschinenmitte, wobei vor und nach dem Probebetrieb in etwa 1 m Entfernung von der Maschine zu messen ist. Die Lufttemperatur ist während des letzten Viertels der Versuchszeit in regelmäßigen Zeitabschnitten zu messen und daraus der Mittelwert zu nehmen.

Mit Ausnahme der Feldspulen und aller ruhenden Wicklungen werden alle Teile der Generatoren und Motoren mittels Thermometers auf ihre Temperaturzunahme untersucht.

Die Temperatur der Feldspulen und aller ruhenden Wicklungen ist aus der Widerstandszunahme zu bestimmen.* Dabei ist, wenn der Temperaturkoeffizient des Kupfers nicht für jedem Fall besonders bestimmt wird, dieser Koeffizient als 0,004 anzunehmen.

In gewöhnlichen Fällen und insofern die Lufttemperatur 35° C nicht übersteigt, darf die Temperaturzunahme folgende Werte nicht überschreiten:

a) An isolierten Wicklungen bei
   Baumwollisolierung . . . . 50° C,
   Papierisolierung . . . . 60° „,
   Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate 80° „.

* Vgl. § 32, 10. Beispiel.

Für ruhende Wicklungen sind um 10° C höhere Werte zulässig.

b) an Kollektoren 60° C;

c) an Eisen der Maschinen, in das Wicklungen eingebettet sind, je nach der Isolierung die Werte unter a).

Im praktischen Betriebe sollen Überlastungen nur so kurze Zeit oder bei solchem Temperaturzustand der Maschinen vorkommen, daß die zulässige Temperaturzunahme dadurch nicht überschritten wird. Mit dieser Einschränkung müssen Maschinen um 25 % während ½ Stunde überlastungsfähig sein.* Der Kollektor darf hierbei nicht so stark angegriffen werden, daß der Gang bei normaler Leistung der früher angeführten Bedingung nicht mehr entspricht.

In bezug auf mechanische Festigkeit müssen Maschinen, die betriebsmäßig mit annähernd konstanter Umlaufszahl arbeiten, leerlaufend eine um 15 % erhöhte Umlaufszahl unerregt und vollerregt 5 Minuten lang aushalten.

Stromerzeuger müssen bei konstanter Umlaufszahl die Spannung bis zu 15 % Überlastung konstant halten können.

Die Messung des Isolationswiderstandes wird nicht vorgeschrieben, wohl aber eine Prüfung auf Isolierfestigkeit (Durchschlagsprobe), welche am Erzeugungsort, bei größeren Maschinen auch vor Inbetriebsetzung am Aufstellungsort vorzunehmen ist. Die Maschinen müssen imstande sein, eine solche Probe mit einer im nachfolgenden festgesetzten höheren Spannung, als die normale Betriebsspannung ist, ½ Stunde lang auszuhalten. Die Prüfung ist bei warmem Zustande der Maschine vorzunehmen und später nur ausnahmsweise zu wiederholen, damit die Gefahr einer späteren Beschädigung vermieden wird.

Maschinen bis 5000 Volt** sollen mit der doppelten Betriebsspannung, jedoch nicht weniger als 100 Volt*** geprüft werden. Diese Prüfspannungen beziehen sich auf Isolation von Wicklungen gegen das Gestell, sowie bei elektrisch getrennten Wicklungen gegeneinander. Im letzteren Falle ist bei Wicklungen verschiedener Spannung immer die höchste sich ergebende Prüfspannung anzuwenden. Obige Angaben über die Prüfspannung gelten unter der Annahme, daß die Prüfung mit gleicher Stromart vorgenommen wird, mit welcher die Wicklungen im Betriebe benutzt werden. Sollte dagegen eine betriebsmäßig mit Gleichstrom durchflossene Wicklung mit Wechselstrom geprüft werden, so braucht nur der 0,7-fache Wert der vorgenannten Prüfspannung angewendet zu werden. Ist eine Wicklung betriebsmäßig mit dem Gestell leitend verbunden, so ist diese Verbindung für die Prüfung auf Isolierfestigkeit zu unterbrechen. Für Magnetspulen mit Fremderregung ist die Prüfspannung das Dreifache der Erregerspannung, jedoch mindestens 100 Volt.

---

* Motoren außerdem um 40 % während 3 Minuten.

** Diese obere Grenze kommt kaum bei Gleichstrommaschinen in Betracht.

*** Das bezieht sich auf Maschinen für eine Spannung unter 50 Volt.

Maschinen sollen durch 5 Minuten eine um 30% erhöhte Betriebsspannung aushalten können. Bei Maschinen darf die Überspannungsprobe mit einer Steigerung der Umlaufszahl bis zu 15% verbunden werden, wobei jedoch nicht gleichzeitig eine Überlastung eintreten darf. Diese Prüfung soll nur die Isolierfestigkeit feststellen und bei solcher Temperatur der Magnetspulen beginnen, daß die zulässige Temperaturzunahme nicht überschritten wird.

Der Wirkungsgrad ohne besondere Angabe der Belastung bezieht sich auf die normale Belastung.*

10. Kapitel.

Die Gleichstrommotoren.

§ 88. Vorbemerkungen.

Die Motoren benutzen die in § 67, 8. Versuch, behandelte Kraftwirkung zwischen Strom und Feld, deren Richtung nach der Regel der linken Hand vorausbestimmt werden dann, und deren Größe in § 70, C klargestellt ist. Indem viele stromdurchflossene Drähte in einem magnetischen Felde Kraftwirkungen in gleichem Drehsinn erzeugen, kommt man zu Kräften, die zu Betriebszwecken herangezogen werden können. Es ist dazu eine Stromquelle erforderlich, die imstande ist, die nötige elektrische Leistung abzugeben.

Befindet sich ein stromdurchflossener Draht, etwa in Anordnung nach Fig. 297, innerhalb eines magnetischen Feldes in Ruhe, so gilt

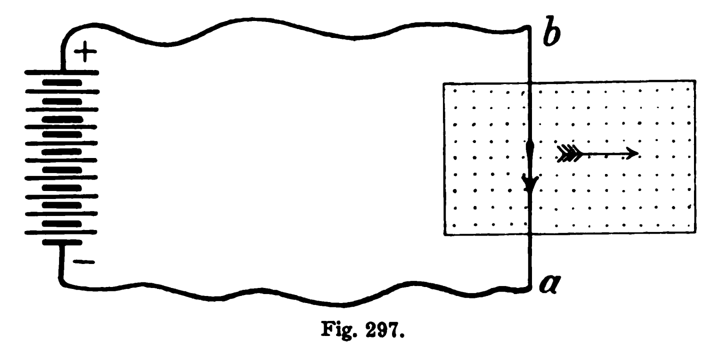


Fig. 297.

für ihn das Ohmsche Gesetz in einfachster Form. Bedeutet E die EMK des Stromkreises und W seinen Widerstand, so gilt mit oder ohne Feld

* Die Normalien enthalten in vielen Punkten, im besonderen auch in bezug auf den Wirkungsgrad, umfangreichere Angaben.

für den ruhenden Draht die Stromstärke:

$$I_{\text{max.}} = \frac{E}{W}.$$

Wird nun der im Felde liegende Draht losgelassen, so führt er im Sinne der Kraftwirkung zwischen Strom und Feld eine Bewegung aus, bei der er Kraftlinien schneidet. Mit den Zeichen der Fig. 297, die die Kraftlinien, welche in die Bildebene hinein gehen mögen, durch Punkte darstellt, würde nach der Regel der linken Hand eine Bewegung des Drahtes *ab* von links nach rechts erfolgen. Die Regel der rechten Hand zeigt, daß bei dieser Bewegung eine Spannung an dem Draht *ab* induziert wird, die bestrebt ist, dem fließenden Strome entgegenzuwirken. Diese Spannung bildet eine elektromotorische Gegenkraft (EMGK) zu E; ihre Formelbezeichnung sei E'' (vgl. § 33). Die Stromstärke bei bewegtem Drahte beträgt nun:

$$I = \frac{E - E''}{W};$$

die Stromstärke ist bei konstantem E im letzteren Fall kleiner, als im ersteren.

Bewegt sich der Draht so schnell durch das Feld, daß $E'' = E$ wird, so wird die Stromstärke des Kreises der Null gleich.

§ 89. Der Anker im konstanten Felde.

Es liege ein Anker vor, der genau so eingerichtet ist, wie der Anker eines Generators. Als einfachster Fall diene der Ringanker zwischen zwei Magnetpolen konstanter Kraftlinienzahl als Gegenstand für die ersten Betrachtungen, so wie er in Fig. 298 schematisch dargestellt ist. Dem Anker werde ein Strom durch ein Bürstenpaar zugeführt; die Bürsten mögen an derselben Stelle aufliegen, wo sie bei den ersten Betrachtungen des Stromerzeugerankers auflagen, d. h. sie mögen stets mit den in der Mitte zwischen zwei Polspitzen liegenden Ankerdrähten in Verbindung stehen, so wie es Fig. 298 im Schema zeigt. Der Pluspol der Stromquelle liege an derjenigen Bürste, die im Falle des Stromerzeugerankers (vgl. Fig. 225) Pluspol war. Die Richtung des Magnetfeldes sei, wie in Fig. 225, von links nach rechts angenommen.

Der Strom fließt bei dieser Anordnung im Falle des Motors, der ein Stromverbraucher ist, in entgegengesetztem Sinn durch den Anker, als im Falle des Stromerzeugers. Sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite des Ringes in Fig. 298 sind alle Drähte, die unter einem Polschuh liegen, in derselben Richtung durchflossen, es addieren sich zunächst die Kraftwirkungen der einzelnen unter einem Pole liegenden Drähte. Aus der Regel der linken Hand folgt weiterhin, daß die Drähte unter dem Nordpol, deren Strom auf den Beschauer zuläuft, eine Kraftwirkung von unten nach oben erhalten, die entgegengesetzt durchflossenen Drähte unter dem Südpol erhalten eine Kraft von oben

nach unten. Beide Seiten der Wicklung suchen also den Ring in demselben Sinne zu drehen.

Der Drehsinn des Motorankers ist derselbe, den man anwenden muß, um am Stromerzeugeranker bei gleicher Feldrichtung an den Bürsten die gleiche elektrische Polarität zu erhalten. Hierdurch ist

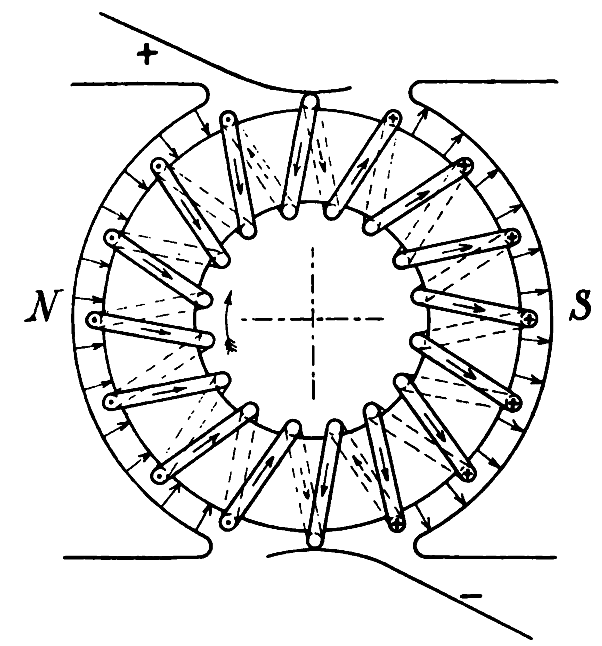


Fig. 298. Schema des Motor-Ringankers.

auch an dem Beispiel eines Ankers klargestellt, daß er durch Strom getrieben eine EMGK erzeugt, wie sie in § 88 nur für einen Draht betrachtet wurde. Die gemäß Fig. 298 unter einem Pol erzeugten elektromotorischen Gegenkräfte der einzelnen Leiter addieren sich, während die beiden Wicklungshälften, die beide die gleiche EMGK erzeugen, parallelgeschaltet sind.

Wird der an eine konstante Netzspannung E' (Volt) gelegte Anker festgehalten, so fehlt die Gegenspannung, und es kommt das Ohmsche Gesetz in einfachster Form in Frage:

$$I_{A\,\text{max.}} = \frac{E'}{W_A},$$

wobei $I_{A\,\text{max.}}$ den Ankerstrom (Ampere) und W_A den Ankerwiderstand (Ohm) bedeuten. Diese Stromstärke bildet für die vorhandenen Verhältnisse den Höchstwert, und mit ihr tritt das größte vorkommende Drehmoment auf, das zum Produkt aus Strom und Feld proportional ist.

Läuft der Anker um, und wird dadurch die EMGK von der Höhe E'' (Volt) erzeugt, so beträgt der Ankerstrom

$$I_A = \frac{E' - E''}{W_A} = \frac{e_v}{W_A}$$

also weniger, als bei fest gehaltenem Anker; e_v bedeutet die zur Überwindung des Ankerwiderstandes erforderliche Spannung (Verlustspannung), E'' ist zur Umlaufgeschwindigkeit direkt proportional.

Der obere Grenzfall für die Umlaufgeschwindigkeit tritt auf, wenn der Anker ein

$$E'' = E'$$

erzeugt, d. h. wenn die Gegenspannung gleich der angelegten Spannung ist, denn in diesem Falle wird

$$I_A = 0,$$

und die Triebkraft hört auf; der Anker verbraucht in diesem Falle keine Leistung. Der Fall ist nur denkbar unter Annahme völligen, tatsächlich nicht herstellbaren Leerlaufes, bei dem der Anker sich rein nach dem Gesetz vom Beharrungsvermögen mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegt.

Würde die Umlaufszahl höher und E'' größer als E' gedacht, so würde der Fall eines Dynamoankers vorliegen, der von außen angetrieben werden müßte.

Beim Stillstand des Ankers tritt die ganze Netzspannung als Spannungsverlust zur Überwindung des Ankerwiderstandes, beim reinen Leerlauf tritt sie als EMGK auf.

Wird nun an der Achse des Motors ein Drehmoment abgenommen, das zwischen dem zum Stillstand gehörenden und dem Werte Null liegt,

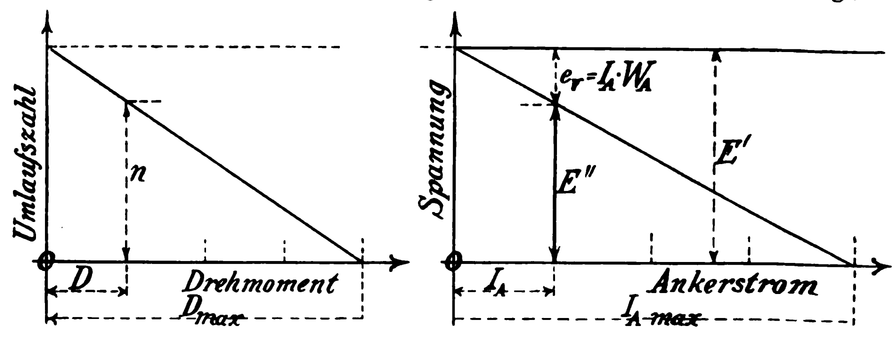


Fig. 299 a. Schaubild zum Magnetmotor. Fig. 299 b.

so genügt eine geringere, als die maximale Stromstärke dieses Drehmoment zu überwinden. Tritt infolge zu großer Ankerstromstärke das zugeführte Drehmoment größer auf, als das Gegendrehmoment, so beschleunigt sich der Anker unter Anwachsen der EMGK und unter Abnahme des Ankerstromes; das zugeführte Drehmoment wird kleiner,

bis bei einer bestimmten, gegen vorher erhöhten Umlaufszahl die Gleichheit zwischen dem zugeführten und dem Gegendrehmoment erreicht ist. Stellt der Ankerstrom ein Drehmoment her, das geringer ist, als das Gegendrehmoment, so verzögert sich der Anker unter Abnahme der EMGK; der Ankerstrom und das Drehmoment wächst, bis bei einer bestimmten Umlaufszahl, die niedriger liegt, als die vorherige, das zugeführte und das Gegendrehmoment wieder gleich sind. Für diesen Beharrungszustand gilt in jeder Belastung infolge der Proportionalitäten zwischen EMGK und Umlaufszahl einerseits und Strom und Drehmoment andererseits für konstante Netzspannung und konstantes Feld eine durch Fig. 299a und b ausgedrückte Gesetzmäßigkeit.

Wird der zum Drehmoment proportional erforderliche Spannungsverlust von der Netzspannung abgezogen, so bleibt für die EMGK ein Rest, der bestimmend ist für die Umlaufszahl. Die Abnahme der Umlaufszahl ist vom reinen Leerlauf aus proportional zum Drehmoment bis zum Stillstand, d. h. zwischen den Achsen der Umlaufszahl und des Drehmomentes stellen sich die Werte gemäß einer von der höchsten Umlaufszahl zum Stillstandsdrehmoment gezogenen geraden Linie ein. Entsprechend wird im Schaubild der elektrischen Größen die Netzspannung durch eine gerade Linie geteilt, derart, daß die über ihr liegenden Werte die zum Ankerstrom proportionalen Spannungsverluste, die unter ihr liegenden die elektromotorischen Gegenkräfte andeuten. In der Abbildung sind zusammengehörige Werte von Drehmoment und Ankerstrom durch Teilstriche angedeutet, während der Maßstab der Umlaufszahl so gewählt sein möge, daß von der EMGK aus direkt hinübergeschnitten werden kann.

Die Produkte aus Verlustspannung und Ankerstrom bilden die Verlustleistung, die Produkte aus EMGK und Ankerstrom die auf den Anker nutzbar übertragene Leistung. In beiden oben genannten Grenzfällen ist die Nutzleistung der Null gleich.

Eine Änderung der Netzspannung hat Änderungen zur Folge, die ersichtlich werden, wenn in den Schaubildern der Fig. 299a und b die Abszissenachsen unter Einhaltung der gleichen Maßstäbe nach oben oder unten um gleiche Stücke verschoben werden.

Die normalen Motoranker besitzen zur Kleinhaltung der Ankerverlustspannung und der Jouleschen Wärme geringe Ankerwiderstände, wie die Anker der Stromerzeuger. Daher liegt der erste Grenzfall der Belastung mit festgehaltenem Anker bei so hohen Ankerstromstärken, daß dieser Grenzfall für die Wirklichkeit nicht in Betracht kommt. Durchschmelzen von Sicherungsstreifen in erster Linie und Verbrennen der Ankerwicklung in zweiter Linie würde eher als der Stillstand die Folge einer Überlastung sein. Ein Anker mit geringem Widerstand erleidet auf Grund obiger Betrachtungen bis zu seiner praktischen Belastungsgrenze im konstanten Felde einen geringen Abfall der Umlaufsgeschwindigkeit, wobei aber die Abfälle immerhin proportional zum Drehmoment bleiben.

Durch die am praktisch ausgeführten Anker vorliegenden Verhältnisse, Vorhandensein von geringem Ankerwiderstand und Auftreten von Hysterese-, Wirbelstrom- und Reibungsverlusten, ändert sich das durch Fig. 299a und b ausgedrückte Verhalten zu dem mit Hilfe von Fig. 300a und b dargestellten: Der nutzbringende Teil der Spannung, die EMGK E'' kommt nahe an die Netzspannung heran, so daß der Spannungsverlust e_v auch in voller Belastung nur nach einigen Prozentteilen der Klemmenspannung E' zählt. Die durch das Produkt aus E'' und dem Ankerstrom I_A gebildete elektrische Leistung findet ihre mechanische Gegenleistung in dem zugehörigen Produkt aus Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit entsprechend der Fig. 300a. Die äußere, an

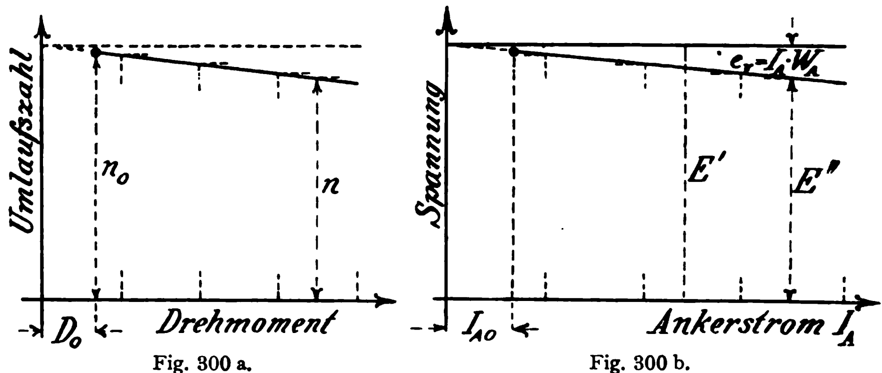


Fig. 300 a. Fig. 300 b.
Schaubild zum Magnetmotor mit geringem Ankerwiderstand.

der Achse abgenommene Leistung wird erhalten, indem man von der oben genannten, mechanischen, auf den Anker übertragenen Leistung die Hysterese-, Wirbelstrom- und Reibungsverluste abzieht. Da diese Verluste auch im praktischen Leerlauf auftreten, ist der Leerlaufstrom I_{A0} ein von Null verschiedener Geringstwert. Ihm entspricht das im Leerlauf auf den Anker übertragene Drehmoment D_0, das bei der höchsten vorkommenden Umlaufszahl n_0 auftritt.

Die Umkehr der Drehrichtung des Ankers erfolgt durch Umkehr entweder der Feldrichtung oder der Ankerstromrichtung; die Umkehr beider Richtungen ergibt Drehung in demselben Sinne.

Der Abfall der Umlaufsgeschwindigkeit von der äußeren Nullbelastung bis zur Vollbelastung ist unter sonst gleichen Verhältnissen um so geringer, je kleiner der Ankerwiderstand ist.

Die Betrachtungen zeigen, daß der normal ausgeführte Anker im konstanten Felde ohne weiteres Zutun aus dem Netz Leistungen entnimmt, die sich der äußeren abgenommenen Leistung anpassen.

§ 90. Die Folge von Feldveränderungen.

Der Motor stellt seinen Beharrungszustand so ein, daß unter Vernachlässigung von Verlustdrehmomenten das zugeführte gleich dem

abgenommenen Drehmoment ist. Das Drehmoment ist proportional zum Produkt aus Strom und Feld, folglich bringt eine Ver-z-fachung der Feldstärke bei gleichem abgenommenen Drehmomente eine Ver-$^1/_z$-fachung der Ankerstromstärke hervor.

Technisch wichtig ist die Feldveränderung an einem Motor mit geringem Ankerwiderstand: Da E'' (Fig. 300b) bei einer bestimmten Umlaufszahl proportional zur Kraftlinienzahl ist, bringt eine plötzliche Verringerung des Feldes an einem laufenden Anker eine in gleichem Maße verringerte EMGK hervor und läßt bei konstanter Netzspannung eine größere Verlustspannung $e_v = I_A W_A$ zu, d. h. es stürzt zunächst ein stärkerer Strom in den Anker. Da e_v gering ist, bringt eine geringe Feldschwächung eine erhebliche Stromvermehrung zustande, und das Produkt aus Feld und Strom, das Drehmoment, wird erheblich vermehrt. Der Anker beschleunigt sich bei unverändertem abgenommenen Drehmoment und bekommt einen neuen Beharrungszustand bei einer höheren Umlaufszahl, für den die Bedingung gilt, daß I_A in gleichem Maße vermehrt ist, als das Feld geschwächt wurde; e_v ist in dem neuen Beharrungszustand gegen den vorherigen proportional zu I_A, also ein wenig vergrößert und E'' gegen den vorherigen Beharrungszustand ein wenig verringert, so daß die neue Umlaufsgeschwindigkeit nicht ganz in dem Maße erhöht auftritt, als das Feld verringert wurde.

Ein Zahlenbeispiel mag den Vorgang erläutern: Die Netzspannung werde zu $E' = 100$ Volt angenommen, der Spannungsverlust vor der Feldänderung beim Strome $I_A = 40$ Ampere zu $e_v = 4$ Volt ($W_A = 0{,}1$ Ohm), so bleibt als EMGK der Wert $E'' = 96$ Volt für den ersten Beharrungszustand, für den die Umlaufszahl in der Minute $n = 1000$ sein möge, übrig. Nun werde das Feld auf $^7/_8$ seines ersten Wertes gebracht, daher ist im ersten Augenblick nach dieser Änderung $E_1'' = 96 \cdot {}^7/_8 = 84$ Volt und der Ankerstrom $I_{A1} = (100 - 84) : 0{,}1 = 160$ Ampere, so daß das erste augenblickliche auf den Anker ausgeübte Drehmoment gegen das vorherige auf den $4 \cdot {}^7/_8 = 3{,}5$-fachen Wert gebracht ist. Der Anker beschleunigt sich dadurch schnell, verringert seinen Strom und nimmt konstante Umlaufsgeschwindigkeit bei $I_A' = 40 \cdot {}^8/_7 = 45{,}7$ Ampere an, verursacht ein $e_v' = 4{,}57$ Volt und eine Gegenspannung $E''' = 100 - 4{,}57 = 95{,}43$ Volt. Der neue Beharrungszustand tritt daher bei

$$n' = 1000 \cdot \frac{8}{7} \cdot \frac{95{,}43}{96} = 1136$$

Umläufen in der Minute ein.

Eine Erhöhung des Feldes hat den umgekehrten Vorgang zur Folge: Im ersten Augenblick nach der Feldverstärkung verringert sich die Stromaufnahme und das Drehmoment, das auf den Anker übertragen wird, der Anker verzögert sich bei dem gleichen Gegendrehmomente und bekommt einen neuen Beharrungszustand bei niedrigerer Umlaufszahl und niedrigerer Stromstärke. Die Ströme in beiden Beharrungszuständen sind umgekehrt proportional zu den Feldstärken unter

Voraussetzung gleicher Drehmomente. Die Erniedrigung der Umlaufszahl tritt nicht ganz im umgekehrten Verhältnis der Feldstärken ein. Beim Übergang von einer niedrigeren zu einer höheren Kraftlinienzahl kann sich unter besonderen Verhältnissen (unter Abgabe eines Teiles der in den umlaufenden Massen vorhandenen kinetischen Energie in Form elektrischer Arbeit an das Netz) der Strom für kurze Zeit umkehren, wodurch ebenfalls eine Verzögerung der Ankerdrehung eintritt.

Die für einen Motor wichtigen Gleichungen lauten in einer Zusammenstellung:

1. $P = \frac{1}{9{,}81} \cdot \mathfrak{H} \cdot I_A \cdot l \cdot 10^{-6}$,
2. $\mathfrak{N} = q \cdot \mathfrak{H}$,
3. $E'' = \mathfrak{N} \cdot z \cdot n' \cdot 10^{-8}$,
   (für Reihenanker $E'' = p \cdot \mathfrak{N} \cdot z \cdot n' \cdot 10^{-8}$),
4. $I_A = \frac{E' - E''}{W_A}$.

dabei bedeutet:

- P die auf den Anker übertragene Umfangskraft am Radius der Ankerwicklung (kg),
- $\mathfrak{H}$ die Feldstärke unter den Polschuhen (Kraftl./qcm),
- I_A den Ankerstrom in allen Zweigen zusammen (Ampere),
- l die wirksame (im Felde $\mathfrak{H}$ liegende) Länge eines Ankerzweiges (cm),
- q den Querschnitt des von $\mathfrak{H}$ durchsetzten Raumes unter einem Polschuh (qcm),
- p die Anzahl der Magnetpolpaare,
- $\mathfrak{N}$ die an einem Polschuh auftretende Kraftlinienzahl,
- E' die Klemmenspannung des Ankers (Volt),
- E'' die EMGK des Ankers (Volt),
- W_A den Ankerwiderstand (Ersatzwiderstand aller parallelgeschalteter Zweige zusammen) (Ohm),
- z die Zahl der Leiter rund um den Anker,
- n' die Umlaufszahl in der Sekunde.

Aus diesen Gleichungen lassen sich eine Reihe anderer bilden, die das Verhalten eines Motors formelmäßig ausdrücken, von denen der Ausdruck für die Umlaufszahl

$$n' = \frac{E' - I_A \cdot W_A}{\mathfrak{N} \cdot z} \cdot 10^8$$

$$\left(\text{für Reihenanker } n' = \frac{E' - I_A W_A}{p \cdot \mathfrak{N} \cdot z} \cdot 10^8\right)$$

hervorgehoben sein möge.

§ 91. Ankerrückwirkung, Stromwendung und Bürstenverstellung.

Die Art des Auftretens der Ankerrückwirkung beim Motor (im Gegensatz zum Stromerzeuger vgl. Fig. 257) wird durch Fig. 301 er-

läutert: Die Ankeramperewindungen würden, wenn sie allein vorhanden wären, einen Kraftfluß im Sinne der in dieser Figur gerissen gezeichneten Linien erzeugen, also eine Quermagnetisierung entgegengesetzt derjenigen des Generators. Diese Betrachtungen gelten auch wieder für Ring und Trommel. Fig. 301 zeichnet ebenfalls nur den wesentlichen sich durch Ankereisen und Polschuh schließenden Teil dieser Linien. Das von den Magnetspulen herrührende Feld setzt sich mit demjenigen des Ankers zu einem resultierenden zusammen, das gegen den Leerlauf des Motors eine Verstärkung am Vorderhorn und eine Verschwächung am Hinterhorn aufweist. Die Ablenkung ist bei gleicher Drehrichtung entgegengesetzt der in Fig. 259 für den Stromerzeuger gezeichneten. Die neutrale Stelle des Ankers verschiebt sich beim belasteten Motor ein Stück gegen den Umlaufssinn des Ankers. Ist nicht durch besondere Mittel eine Bürstenverstellung unnötig gemacht, so sind daher auch die Bürsten beim Übergang vom Leerlauf zur Belastung ein Stück gegen die Umlaufsrichtung zu verstellen. Die nach dieser Bürstenverstellung in ihrer Windungsebene mit derjenigen der Feldspulen zusammenfallenden Ankeramperewindungen verringern ebenfalls wieder (vgl. beim Generator Fig. 261) den Gesamtkraftfluß. Werden die Bürsten von der Mitte zwischen den Polhörnern aus nicht verstellt, so verringert sich auch schon durch die bloße Ablenkung des Kraftflusses und die damit verbundene Vergrößerung des magnetischen Widerstandes die Zahl der Kraftlinien.

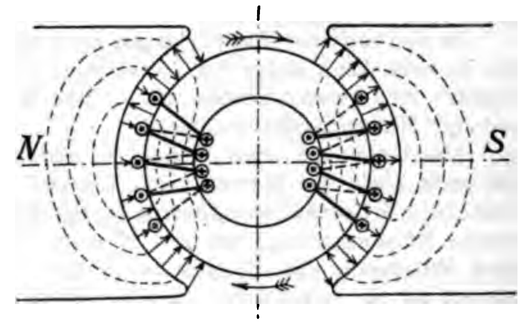


Fig. 301. Schema zur Ankerrückwirkung des Motors.

Dieselben Mittel wie beim Stromerzeuger drücken die Störung durch Ankerrückwirkung herab: genügend groß in radialer Richtung bemessener Luftraum zwischen Polschuh und Anker, genügend hoch gesättigte Ankerzähne, Polschuhe besonderer Form, im Sinne einer Kompensation der Ankeramperewindungen wirkende Wendepole. Bei Anwendung von Polschuhen besonderer Form tritt auch hier wieder der Fall auf, daß eine Maschine nur für einen Umlaufssinn als Motor eingerichtet sein kann (vgl. die Betrachtungen im Anschluß an Fig. 267).

Sinngemäß auf den Motor übertragene Erörterungen entsprechend denjenigen von § 82, F führen zu dem Ziele, daß eine Bürstenverstellung gegen den Drehsinn über die neutrale Stelle so weit hinaus zu erfolgen hat, bis die Induktionsspannung im Felde des nahen Poles die Selbstinduktionsspannung der in Stromumkehr befindlichen Ankerspule kompensiert. Wendepolmotoren ziehen in Mittelstellung der Bürsten

den zur Kompensation der Selbstinduktionsspannung erforderlichen Teil des Kraftflusses auf die der Stromwendung unterworfene Spule. Bei Verwendung einer Wendepolmaschine sowohl als Stromerzeuger, wie als Motor stellt sich ohne Umschaltung zwischen Anker und Wendepol das kommutierende Feld im richtigen Sinne ein, wenn Drehsinn, elektrische Polarität am Anker und Magnetfeld beidemal gleich sind, so daß ohne Bürstenverstellung und ohne Umschaltung zwischen Anker und Wendepolen vom Falle des Motors zu dem des Generators und umgekehrt übergegangen werden kann.

In den weiteren Entwicklungen vom Verhalten und der Steuerung von Motoren kann daher bei Wendepolmaschinen an Stelle des Wortes „Anker“ stets gesetzt werden „Anker und Wendepolwicklung in unveränderter Hintereinanderschaltung“.

Maschinen, die ohne Wendepole sowohl allein als Stromerzeuger, wie auch allein als Motoren vom Leerlauf bis Vollast ohne Bürstenverstellung arbeiten, beanspruchen in der Regel als Stromerzeuger eine andere Bürstenstellung, wie als Motoren. Stellt man an Maschinen ohne Wendepole die Bürsten auf Mitte zwischen symmetrische Polhörner, so gilt beim Motor dasselbe wie beim Generator: die Stromdichte unter der Bürste ist im ablaufenden Teile größer, als im auflaufenden.

§ 92. Die Erregungsarten.

A. Der Hauptschlußmotor.

Bei einem Hauptschlußmotor sind Magnetwicklung und Anker hintereinandergeschaltet, so wie es Fig. 302 für einen in Betrieb befindlichen Motor unter Weglassung aller Hilfseinrichtungen andeutet. Die Einrichtung eines Hauptschlußmotors ist gleich derjenigen eines Hauptschlußgenerators, so daß eine Hauptschlußmaschine sowohl als Stromerzeuger, wie auch als Motor verwendet werden könnte: Der Motor besitzt einen Anker, wie er in § 90 als normal angegeben ist, d. h. mit geringen Verlusten, und eine Magnetwicklung aus dicken Kupferwindungen, die ebenfalls wenig Leistung in Wärme umsetzt. Infolge der Hintereinanderschaltung von Magnetspulen und Anker ist bei schwachem Ankerstrome die Feldstärke gering, bei hohem Ankerstrome die Feldstärke hoch.

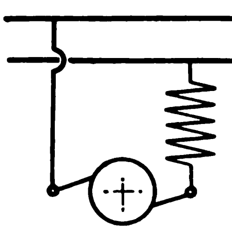


Fig. 302. Schema des Hauptschlußmotors.

Da das auf die Achse übertragene Drehmoment proportional zu dem Produkt aus Ankerstrom und Feldstärke ist, und da eine Feldschwächung eine Erhöhung, eine Feldverstärkung eine Erniedrigung der Umlaufsgeschwindigkeit verursacht, folgt für das Verhalten eines Hauptschlußmotors an konstanter Netzspannung: Die Umlaufszahl ist bei großem Drehmoment gering, bei geringem Drehmoment groß; von einem mittleren Betriebsfall aus erfordert eine Steigerung des Dreh-

moments eine Steigerung der Stromstärke, die aber niedriger als proportional zum Drehmoment auftritt; von einem mittleren Betriebsfall aus erfordert eine Verringerung des Drehmomentes eine Verringerung der Stromstärke, die aber höher, als proportional zum Drehmoment auftritt; der Hauptschlußmotor darf niemals vollständig leer laufen, da seine Umfangsgeschwindigkeit in diesem Falle unzulässig hoch werden würde, so daß die umlaufenden Teile durch Fliehkraft zerstört werden können.

Für einen Hauptschlußmotor wird entsprechend den am Schluß von § 90 angegebenen Gleichungen:

1. $P = \frac{1}{9{,}81} \cdot \mathfrak{H} \cdot I \cdot l \cdot 10^{-6}$,
2. $\mathfrak{N} = q \cdot \mathfrak{H}$,
3. $E'' = \mathfrak{N} \cdot z \cdot n' \cdot 10^{-8}$
   (für Reihenanker $E'' = \mathfrak{p} \cdot \mathfrak{N} \cdot z \cdot n' \cdot 10^{-8}$).
4. $I = \frac{E' - E''}{W_A + W_M}$.

Gegen die Gleichungen von § 90 ist hier nur an Stelle I_A der Buchstabe I getreten, der den Strom des Motors bedeutet, und an Stelle von W_A die Summe $W_A + W_M$, in der W_M den Widerstand der Magnetwicklung ausdrücken möge. Zwischen I und $\mathfrak{H}$ besteht keine einfache Beziehung.

Wäre das Feld proportional zum Strome, so würde der Stromanstieg mit Vergrößerung des auf den Anker übertragenen Drehmomentes proportional zur Quadratwurzel aus diesem Drehmoment sein. Die Umlaufszahl würde sich nach einem Ausdruck

$$n' = \frac{10^8}{c \cdot z}\left[\frac{E'}{I} - (W_A + W_M)\right]$$

(vgl. § 90 Ende) und bei konstanter Klemmenspannung zu

$$n' = \frac{k_1}{I} - k_2$$

ergeben, wobei k_1 und k_2 zu einem bestimmten Motor und einer bestimmten Klemmenspannung gehörende konstante Werte bedeuten. Diese Gesetzmäßigkeit bildet nur eine Anlehnung für das wirkliche Verhalten, da die Proportionalität zwischen Strom und Feld für magnetische Kreise, die Eisen enthalten, nicht vorhanden ist; vielmehr tritt an ihre Stelle die im Gebiet des Magnetismus behandelte Krümmung auf, die auch für einen Motor entsprechend den Angaben zu Fig. 244 durch Abnahme einer Leerlaufcharakteristik zum Vorschein kommt. Dabei ist wieder zu berücksichtigen, daß infolge der Ankerrückwirkung die EMGK des belasteten Motors bei der gleichen Stromstärke geringer ist, als die Leerlaufspannung.

Wie sich die Verhältnisse für einen an konstanter Klemmenspannung liegenden Hauptschlußmotor tatsächlich gestalten, mögen in einem Beispiel die durch Figg. 303 und 304 dargestellten Linien zeigen, die für einen kleinen, an konstant 90 Volt liegenden Motor vom Widerstande $W_A + W_M = 4$ Ohm gelten. Da der Motor mit starker Sättigung arbeitet, weist die an der Bremsscheibe (vom Radius 10 cm) abgenommene Umfangskraft P mit steigender Stromstärke nur eine geringe

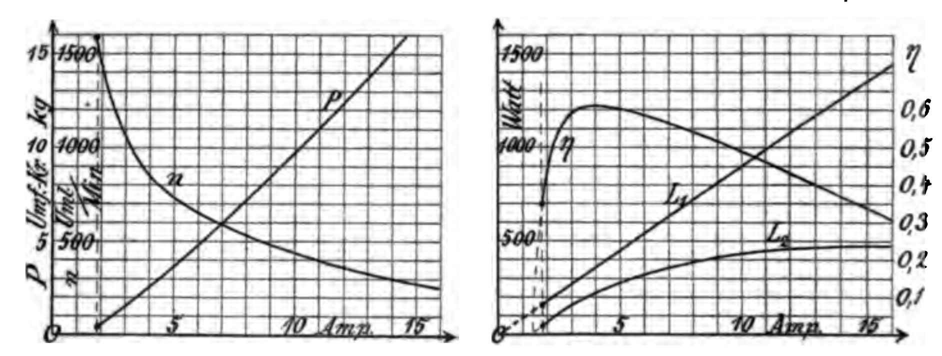


Fig. 303. Schaubilder zum Hauptschlußmotor. Fig. 304.

Krümmung auf. Eine Verlängerung der Linie für P nach links unten führt nicht zum Koordinatenursprung, sondern zu dem Leerlaufstrom, mit dem in einem stark geschwächten Felde das Leerlaufsdrehmoment überwunden werden würde.

Die Umlaufszahl verringert sich im vorliegenden Beispiel von der geringsten bis zur höchsten zulässigen Belastung etwa im Verhältnis 4,5 : 1; eine weitere Entlastung, als gezeichnet, würde ein schnelles Anwachsen der Umlaufszahl zur Folge haben. Die abgenommene Leistung L_2 wird in höherer Belastung angenähert konstant, d. h. für ein gewisses Bereich stehen P und n in umgekehrtem Verhältnis. Die zugeführte Leistung L_1 bildet in Abhängigkeit vom Strome wegen der Konstanz der Klemmenspannung genau eine Gerade. Der Höchstwert des Wirkungsgrades $\eta = L_2 : L_1$ wird an vorliegendem Motor in der Nähe von 4 Ampere zu $\eta_{max.} = 0{,}61$ erreicht, während 6 Ampere die maximal zulässige Dauerbelastung bilden. Für größere Motoren sind höhere Wirkungsgrade erreichbar.

Im allgemeinen ist der Hauptschlußmotor wenig sparsam mit der Leistung, vor allem, wenn das Verhalten in weiten Grenzen ausgenutzt wird. Ein hohes η ist immer nur für ein verhältnismäßig kleines Bereich vorhanden.

Das hier skizzierte Verhalten macht den Hauptschlußmotor geeignet zum Hubmotor an Lasthebezeugen, da ohne Vorgelege eine schnelle Überwindung kleiner und eine langsame Überwindung großer Lasten erreicht wird, und zum Antrieb von Straßenbahnwagen, da das große,

zum Anfahren erforderliche Drehmoment mit geringerem Strome hergestellt wird, als bei einem Motor mit einem mittleren konstanten Felde.

Durch die Gefahr des völligen Leerlaufes ist es ausgeschlossen, an Hauptschlußmotoren Riemenübertragungen anzuwenden, da Riemen abrutschen können. Es kommen vielmehr als Übertragungsmittel nur Zahnräder- (an Straßenbahnwagen) oder Schneckenvorgelege (an Hebezeugen) in Betracht.

B. Der Nebenschlußmotor.

Ein im Betrieb befindlicher Nebenschlußmotor ist nach dem Schema der Fig. 305 angeschlossen, in der zwischen der Leitung und dem Motor alle Hilfseinrichtungen weggelassen sind. Das Wesentliche ist: Die Magnetwicklung wird an dieselben Klemmen gelegt, an denen der Anker liegt, d. h. die Magnetwicklung liegt im Nebenschluß zum Anker. Sie besteht, wie beim Nebenschlußstromerzeuger, aus vielen dünnen Kupferwindungen. Ihr Leistungsverbrauch wird durch Kleinhaltung ihres Stromes gering. Es ist die Einrichtung eines Nebenschlußmotors gleich derjenigen eines Nebenschlußgenerators, so daß eine Nebenschlußmaschine sowohl als Stromerzeuger, wie auch als Motor verwendet werden kann.

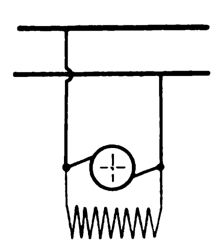


Fig. 305. Schema des Nebenschlußmotors.

Da in technischen Betrieben die Netzspannung konstant gehalten wird, sind infolge der Parallelschaltung von Anker und Magnetwicklung die Ströme beider Teile voneinander unabhängig, d. h. der Strom in dem einen Teil kann ohne Störung des Stromes in dem anderen Teile geändert werden. Wird zunächst von zusätzlichen Widerständen im Erregerkreise abgesehen, so ändert sich bei konstanter Netzspannung der Strom in der Magnetwicklung nicht; die Magnetwicklung weist vielmehr in jeder Belastung des Ankers die gleiche Amperewindungszahl auf.

Da die Ankerrückwirkung eine Schwächung des von den Magnetspulen herrührenden Kraftflusses verursacht, liegt beim Nebenschlußmotor an konstanter Spannung nicht ganz der Motor mit konstantem Felde vor, wie er am Schlusse von § 89 behandelt wurde; es verringert sich vielmehr gegen den dort erörterten Fall der Kraftfluß bei belastetem Anker in geringem Maße.

Wird ein und derselbe Motor das eine Mal als Motor mit konstantem Kraftfluß belastet gedacht, während der Anker an konstanter Klemmenspannung liegt, und das andere Mal als Nebenschlußmotor, während Anker und Magnetwicklung an derselben konstanten Klemmenspannung liegen, so folgt aus obigem, daß unter Verwendung gleichen Ausgangsfeldes für den Leerlauf bei gleichem Ankerstrome die Umlaufsgeschwindigkeit des belasteten Nebenschlußmotors etwas höher sein muß, als diejenige des Motors mit konstantem Felde. Das Drehmoment des Nebenschlußmotors, das auf den Anker übertragen wird, ist hierbei

aber in demselben Maße geschwächt, wie der Kraftfluß. Das Schema der Fig. 300b bleibt, wenn man zugleich konstantes W_A annimmt, für den Nebenschlußmotor bestehen, während die Proportionalität zwischen den Koordinaten von Ankerstrom und Drehmoment einerseits, sowie EMGK und Umlaufszahl anderseits nicht mehr vorhanden ist. Hingegen würden die Verhältnisse auf Grund der Figg. 300a und b und der Angaben des § 90 für den Nebenschlußmotor konstruiert werden können, falls die Feldschwächung durch den Ankerstrom bekannt wäre. Immerhin handelt es sich um geringe Abweichungen von dem für den Motor mit konstantem Felde skizzierten Verhalten. Es gelten für den Nebenschlußmotor die in § 90 gegebenen Gleichungen, nur ist zu berücksichtigen, daß die Größen $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{N}$ keine konstanten Werte mehr bedeuten, und daß der Strom, den der Nebenschlußmotor aufnimmt, sich zusammensetzt aus dem Ankerstrome I_A und dem Strome der Magnetwicklung i_M; so folgt für den Gesamtstrom

$$I = I_A + i_M.$$

Wie das Verhalten eines Nebenschlußmotors tatsächlich eintritt, mögen in einem Beispiel die Figg. 306 und 307 schaubildlich zeigen. Es handelt sich hier um einen kleinen Motor für 110 Volt Netzspannung und 9,1 Ampere Gesamtstrom für Dauerbelastung, dessen Ankerwiderstand $W_A = 0{,}82$ Ohm und dessen Magnetwicklungswiderstand $W_m = 90$ Ohm beträgt. Die Schaulinien sind zum unmittelbaren Vergleich mit dem Hauptschlußmotor in gleiche Achsen wie bei

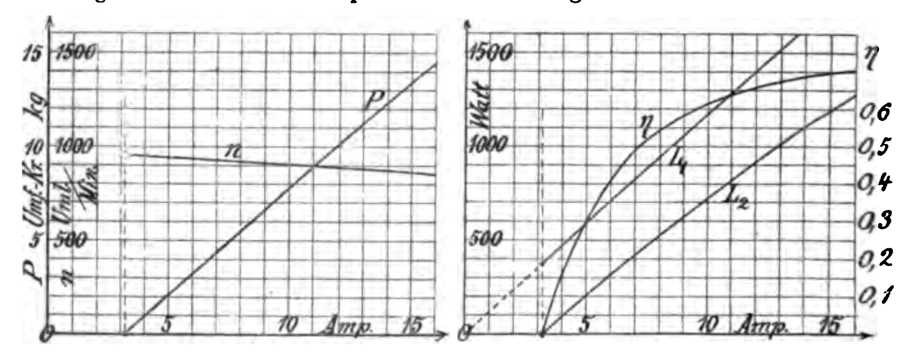


Fig. 306. Schaubilder zum Nebenschlußmotor. Fig. 307.

Figg. 303 und 304 gezeichnet, wobei hier die Abszissen I den Gesamtstrom bedeuten. Die Bremsscheibe besitzt den gleichen Halbmesser von 10 cm. Die Klemmenspannung ist auch hier wieder konstant gehalten, und zwar zu $E' = 110$ Volt. Von einer Krümmung in der Linie der an der Bremsscheibe auftretenden Umfangskraft P ist praktisch nichts zu merken. Das gleiche gilt von der minutlichen Umlaufszahl n. Die zugeführte Leistung L_1 bildet in Abhängigkeit vom Strome bei konstantem E' genau eine Gerade, während von der abgenommenen

Leistung L_2 eine Krümmung in dem Sinne bemerkbar ist, daß die Differenz $L_1 - L_2$ mit wachsendem I zunimmt. Das Verwendungsbereich geht bis auf $P = 0$ herab, wo der Motor 3,2 Ampere aufnimmt, von denen rund 1,2 Ampere auf die Erregung und 2 Ampere auf den leerlaufenden Anker entfallen. Vom Leerlauf bis nahezu zum Doppelten der normalen Belastung nimmt die Umlaufszahl schon bei diesem kleinen Motor nur um etwa 11 $^0/_0$ des Leerlaufswertes ab. Der Wirkungsgrad steigt innerhalb des gezeichnetes Bereiches, dessen obere Grenze für kurzzeitigen Betrieb als die äußerste praktische Grenze angesehen werden kann, bis zu $\eta = 0{,}715$. Größere Motoren lassen sich mit höherem η und geringerem Abfall der Umlaufszahl herstellen.

Die völlige Entlastung eines Nebenschlußmotors, auch wenn sie plötzlich eintritt, ist ungefährlich, und es kann daher auch der Riemen, sowie jedes andere mechanische Übertragungsmittel verwendet werden. Der Nebenschlußmotor ist sparsam, da das hohe η sich über ein verhältnismäßig großes Belastungsbereich ausdehnt.

Der Nebenschlußmotor kann in seiner Wirkungsweise mit einer durch Fliehkraftregler gesteuerten Dampfmaschine verglichen werden. Durch dieses Verhalten ergibt sich das weite Gebiet für die Anwendung des Nebenschlußmotors: Er kann überall an Stelle eines anderen auf angenähert gleiche Umfangsgeschwindigkeit geregelten Antriebsmotors treten und eignet sich besonders für Fabriks-, Werkstatts-, Gruppen- und Einzelantriebe, sowie zum Betrieb von Personen- und Warenaufzügen.

Abweichungen von dem hier erörterten Verhalten des Nebenschlußmotors durch äußeres Zutun und Punkte, auf die zur Vermeidung von Störungen oder Gefahr besonders hinzuweisen ist, sind in § 93 behandelt.

C. Der Doppelschlußmotor.

Ein Doppelschlußmotor entsteht, wenn eine Anzahl von Hauptschlußwindungen zugleich mit Nebenschlußwindungen zur Magnetisierung verwendet werden. Hier sind zwei Fälle möglich: entweder wirken die Hauptschlußwindungen im Sinne der Nebenschlußwindungen, so entsteht ein Motor, dessen Verhalten zwischen demjenigen des Hauptschlußmotors und des Nebenschlußmotors liegt; oder die Hauptschlußwindungen führen Strom in entgegengesetztem Sinne, als die vorherrschenden Nebenschlußwindungen, so wird durch den Hauptstrom das Feld geschwächt und die Umlaufszahl erhöht. Letzterer Fall tritt ein, wenn man einen Doppelschlußgenerator, wie er früher behandelt wurde, ohne Umschaltung als Doppelschlußmotor laufen läßt. Dieser Fall ist etwas näher zu beleuchten:

Sind die Hauptschlußwindungen eines Doppelschlußgenerators so bemessen, daß die Klemmenspannung bei konstanter Umlaufszahl ungefähr konstant gehalten wird, so hält dieselbe Maschine, als Motor verwendet, bei konstanter Klemmenspannung die Umlaufszahl innerhalb normaler Belastung angenähert konstant. Durch Erhöhung der Zahl

der Hauptschlußwindungen gegen diesen Fall wird erreicht, daß die Umlaufszahl des Motors mit wachsender Belastung steigt. Bei dem hier behandelten Richtungssinn des Hauptstromes gibt es einen Fall, in dem die Hauptschlußamperewindungen diejenigen des Nebenschlusses gerade aufheben, so daß das Feld und das Drehmoment bei hohem Ankerstrome der Null gleich werden kann; dieser Fall bildet eine Stelle eines Strombelastungsbereiches, in dem der Motor versagt:

Aus Gleichung 1 in § 90 folgt, daß für einen bestimmten Motor das auf den Anker übertragene Drehmoment

$$D = c \cdot \mathfrak{H} \cdot I_A$$

ist, wobei $\mathfrak{H}$ die Feldstärke unter den Polschuhen, I_A den Ankerstrom und c eine zu dem Motor gehörige Konstante bedeutet. Folgt einer Vergrößerung des Drehmomentes eine solche Feldschwächung und eine in dem Maße vermehrte Ankerstromstärke, daß das Produkt $\mathfrak{H} \cdot I_A$ entsprechend der Vermehrung des Drehmomentes wächst, so ist die Mehrbelastung angängig, denn es tritt mit ihr ein neuer Beharrungszustand auf. Die genannte Bedingung ist aber in der Überlastung von einem bestimmten Punkte ab nicht mehr erfüllt, denn das Feld nimmt mit Verringerung der in Summa auftretenden Amperewindungszahl erst in geringem und dann in immer höherem Maße ab. Die Grenze der Überlastungsmöglichkeit liegt da, von wo ab ein bestimmter Prozentsatz der Stromsteigerung einen größeren Prozentsatz der Feldschwächung zur Folge hat. Von hier ab verringert sich mit steigendem Ankerstrome das Drehmoment, es verzögert sich die Bewegung, der verstärkte Ankerstrom schwächt das Feld noch mehr, und der Anker würde bei einem unzulässig starken Strome dem Stillstande zustreben; dieser Strom würde in seinem Entstehen durch richtig bemessene Sicherungen oder einen Starkstromausschalter im Falle eines gebrauchsmäßig angeschlossenen Motors unterbrochen werden. Der genannte Vorgang vollzieht sich leicht, was durch die augenblicklichen hohen Stromstöße erklärlich ist, die beim Anschließen von Maschinen oder Transmissionsteilen zur Überwindung von Massenkräften erforderlich sind.

Die angedeutete Erscheinung führt dazu, daß Doppelschlußmotoren mit dem gegenläufigen Richtungssinn des Stromes in den Hauptschlußwindungen praktisch kaum Verwendung finden. Nach dem Abtrennen des Motors vom Netz mittels der Sicherungen ist der Motor in der Regel ummagnetisiert, da der Strom sich leicht über den zu $\mathfrak{H} = 0$ gehörigen Wert hinaus verstärkt; das hat zwar für den Motor allein keine Bedeutung, da beim darauffolgenden Anlassen sich der richtige Sinn des Feldes wiederherstellt; störend ist hingegen diese Ummagnetisierung, wenn eine Doppelschlußmaschine normal als Stromerzeuger laufen soll und bei der Ladung von Akkumulatoren* durch irgend eine Zufälligkeit einen

* Vgl. die Bemerkung am Ende von § 81.

Rückstrom erhält. Der Rückstrom läßt den Stromerzeuger als Motor laufen, und es treten dann die in § 107, B angedeuteten Unannehmlichkeiten ein.

§ 93. Anlaß- und Steuerungsfragen.

Vorbemerkung.

Bei stillstehendem Anker fehlt die EMGK, und bei unmittelbarem Anschließen des Motors würde in vielen Fällen infolge des geringen Widerstandes des Motors ein unzulässig hoher Stromstoß auftreten, der Störungen im Netz verursachen würde. Der Grad der Störung richtet sich erstens nach dem Motor selbst, indem unter sonst gleichen Verhältnissen Hauptschlußmotoren geringere Anlaufströme brauchen als Nebenschlußmotoren, und indem kleine Motoren dadurch, daß sie einen größeren Prozentsatz der Klemmenspannung für den Spannungsverlust verwenden, den Anlaufstrom nicht in dem hohen Maße steigern, wie große Motoren; zweitens ist der Grad der Störung um so geringer, je weniger der Motor beim Anlauf belastet ist; drittens schließlich sind die Widerstandsverhältnisse des Motors und der Leitung für den Grad der Störung von Einfluß, indem Leitungen größeren Widerstandes bei Stromsteigerungen erheblichere Spannungsverluste aufweisen, als Leitungen geringeren Widerstandes. Lampen, die von Motorleitungen abzweigen, sind, vor allem wenn der Prozentsatz des Motorstromes denjenigen des Lampenstromes überwiegt, großen Lichtschwankungen unterworfen (Straßenbahnen), die beim Anlassen am erheblichsten sind. Getrennte Motorleitungs- und Lichtleitungssysteme sind daher zweckmäßig. Nebenschlußmotoren können in besonderen Fällen bei direktem Anschließen, obgleich der aufgenommene Strom hoch ist, im Anlauf versagen, nämlich dann, wenn ein sehr großer Spannungsverlust zum Motor hin auftritt, wodurch die Nebenschlußwicklung zu wenig Strom bekommt.

Eine Grenze, bis zu der Motoren durch gewöhnliche Ausschalter angeschlossen werden können, liegt nicht fest, sie würde sich höchstens darnach richten, welchen Prozentsatz des Spannungsverlustes man beim Anlassen als zulässig erachtet. Allgemein üblich ist es kleine Ventilatormotoren, die durch 6-Amperesicherungen geschützt sind, ohne weiteres mit Drehschaltern anzuschließen.

Bei größeren Motoren schaltet man einen Widerstand in den Ankerkreis ein, der von vornherein den normalen Strom in den Anker treten läßt; dieser Strom läßt mit dem zunächst normal gedachten Felde zusammen das normale Drehmoment angreifen; der Anker beschleunigt sich, entwickelt eine mit zunehmender Umlaufszahl steigende Gegenspannung, verringert dadurch seinen Strom und würde einem Beharrungszustande mit niedrigerer als der normalen Umlaufszahl zustreben, wenn nicht inzwischen die vorgeschalteten Widerstände immer mehr verkleinert würden. Jede Verkleinerung der Ohmzahl bringt eine neue Stromsteigerung, eine neue Beschleunigungsperiode und darauf

einen neuen Abfall des Stromes mit sich, so daß der Motor schließlich nach Abschaltung aller vor dem Anker liegenden Widerstände an Netzspannung das im vorigen Paragraphen beschriebene Verhalten zeigt.

Für normale Fälle ist der Widerstand des Motors und der Zuleitung klein gegen den Anlaßwiderstand, so daß vielfach mit genügender Annäherung die Ohmzahl des Anlassers

$$W_V = \frac{E'}{I}$$

gesetzt werden kann, wobei E' die Klemmenspannung und I den ersten Stromstoß bei stillstehendem Anker bedeutet.

Die Abstufung der Widerstände des Anlassers wird zweckmäßig nach einer geometrischen Reihe zu kleiner werdenden Ohmzahlen von Stufe zu Stufe (vgl. § 45 B 3. Fall S. 144) gewählt, bis die letzte Widerstandsstufe von Kontakt zu Kontakt, die vor dem direkten Anschluß liegt, ungefähr die Ohmzahl des Motorkreises aufweist. Ein Arbeiten mit den Gleichungen der geometrischen Reihe führt zu weniger einfachen Rechnungen, und ein Probieren ist hier mehr zu empfehlen.

Die Dicke der Anlasserdrähte wird gewöhnlich geringer gewählt, als daß sie einen im Betrieb vorkommenden Dauerstrom vertragen könnten (vgl. in § 45 B, S. 138 die Bemerkung über kurzzeitige Belastung von Widerstandsdrähten). Wird Widerstand dauernd vor den Anker des in Betrieb befindlichen Motors geschaltet, so ist das für das Verhalten gleichbedeutend mit einer Vergrößerung des Ankerwiderstandes, die beim Nebenschluß- und beim Hauptschlußmotor zu einer Verringerung der Umlaufszahl führt. Dienen Anlaßwiderstände zugleich zur Umlaufsregelung, so werden sie dazu besonders eingerichtet und beanspruchen mehr Widerstandsmaterial als gewöhnliche Anlasser. Außerdem ist es bei gewöhnlichen Anlassern üblich, das durch einen besonders darauf hinweisenden Vermerk am Apparat selbst anzudeuten. Es ist auch für die Bemessung des Widerstandsmateriales von Wichtigkeit, ob der Motor belastet oder unbelastet anlaufen soll.

Es kommt im wesentlichen der Nebenschluß- und in zweiter Linie der Hauptschlußmotor in Frage, während der Doppelschlußmotor, da wo er vorkommen sollte, in bezug auf Anlaßfragen wie ein Nebenschlußmotor zu behandeln ist und hier keiner weiteren Erwähnung bedarf. Seiner größeren Einfachheit wegen sei jedoch der Hauptschlußmotor an erster Stelle behandelt. Im Paragraphen über Steuerschalter kehrt er für weniger einfache Bewegungen wieder.

A. Zum Hauptschlußmotor.

Das Anlassen eines Hauptschlußmotors erfolgt nach dem Schema der Fig. 308, das ein einfaches Vorschalten des Anlaßwiderstandes vor den Motor ausdrückt. Der Widerstand W_V des Anlassers ist so zu bemessen, daß bei stillstehendem Anker die Stromstärke den gewünschten Wert

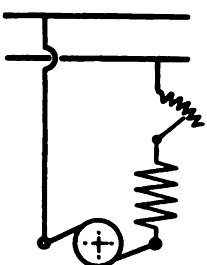
$$I_{\text{Amp.}} = \frac{E'}{W_L + W_A + W_M + W_V}$$

hat, wobei E' die Netzspannung, W_L den Widerstand der Motorleitung, W_A den Ankerwiderstand und W_M den Magnetwicklungswiderstand bedeutet. Daraus folgt für die notwendige Bemessung der Ohmzahl des Anlassers:

$$W_V = \frac{E'}{I} - (W_L + W_A + W_M);$$

der als Subtrahend auftretende Klammerwert ist gegen den Minuend gering.

In starker Belastung zieht der Hauptschlußmotor kräftig an, und zwar aus demselben Grunde, der auch für den im Betrieb befindlichen Motor geltend gemacht wurde, daß nämlich mit hohem Strome zugleich ein starkes Feld vorhanden ist. Deshalb kann auch die Grenze, bis zu der man ohne Anlasser auskommt, bei Hauptschlußmotoren etwas höher gesetzt werden, als bei Nebenschlußmotoren.


Fig. 308. Grundsätzliches Anlaßschema eines Hauptschlußmotors.

Setzt sich der Anker in Bewegung, so gelten gegen die in § 92 A behandelten Verhältnisse folgende Änderungen: Der Motor strebt einem Beharrungszustande zu, der bei der Umgangszahl

$$n' = \frac{10^8}{c\,z}\left[\frac{E'}{I} - (W_L + W_A + W_M + W_V)\right]$$

eintreten würde, falls der Kraftfluß $\mathfrak{N} = c \cdot I$ gesetzt werden könnte. Wenn diese Gleichung auch nur eine Anlehnung an die Wirklichkeit bedeutet, läßt sie doch erkennen, daß Vorschaltwiderstände (W_L und W_V) einen verringernden Einfluß auf die Umlaufszahl bei einem bestimmten Drehmomente (gleiches auf den Anker übertragenes Drehmoment hat gleiches I) ausüben. E' ist in diesem Ausdruck als die konstante Netzspannung, von der die Motorleitung ausgeht, aufzufassen. Eine Verringerung von W_V hat nach dem Behandelten also auch eine Steigerung der Umlaufszahl zur Folge.

Außer diesem für das Anlassen wichtige Ergebnis läßt die Betrachtung erkennen, daß durch Vorschaltwiderstände geeigneter Bemessung auch im Betrieb des Motors die Umlaufsgeschwindigkeit verringert werden kann. Dieses Ergebnis ist wichtig für die Steuerung der Motoren an Lasthebezeugen und Straßenbahnen. Das Verfahren wird vielfach angewendet, obgleich es unwirtschaftlich ist.

In Erweiterung der Bemerkung vom Ende des § 89 betr. die Umkehr der Drehrichtung folgt für den Hauptschlußmotor, daß eine Vertauschung zwischen Motorklemmen und Leitung, also eine Umkehr des Stromes im Motor, keine Umkehr der Drehrichtung herbeiführt. Die Änderung der Drehrichtung ist möglich entweder mit alleiniger Umkehr der Stromrichtung im Anker oder mit alleiniger Umkehr der Stromrichtung in den Magnetspulen. Das erstere ist für Motoren mit

einem Umlaufssinn einfacher, da in dem Falle, daß die gewünschte Drehrichtung nicht vorhanden ist, die Umkehrung des Ankerstromes sich mit Hilfe der beweglichen Bürstenkabel leicht vornehmen läßt. Für Wendemotoren ist die Umkehrung des Ankerstromes ebenfalls das übliche Verfahren.

Eine elektrische Bremsung durch den Anker erfolgt auf Grund der Tatsache, daß ein Motor zugleich auch als Generator wirken kann. Den durch kinetische Energie oder durch Abwärtsbewegung einer Last getriebenen Motor kann man nach Abschaltung vom Netz auf einen Widerstand arbeiten lassen, so daß der Fall eines belasteten Generators eintritt. Die an der Achse angreifende mechanische Arbeit setzt sich dadurch im Belastungskreise in Wärme um. Der Hauptschlußmotor bedarf beim Übergang vom Stromantrieb zu dieser Bremstätigkeit einer der Stromunterbrechung folgenden Neuerregung. Läuft

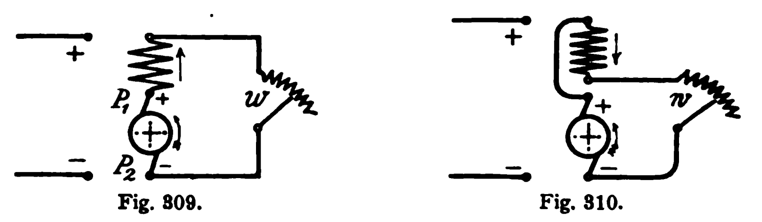


Fig. 309. Fig. 310.

ein Anker durch Strom getrieben in der an Figg. 309 und 310 angegebenen Drehrichtung, so erzeugt der Anker, wie früher gezeigt wurde, bei dieser Drehrichtung und der gleichen Feldrichtung nach Abschaltung den Pluspol da, wo vorher der Pluspol des Netzes gelegen hatte. Die Magnetwicklung würde aber, wenn am Motor nichts umgeschaltet wird, bei einem Versuch nach Fig. 309 eine Bremsung zu erzielen, den entgegengesetzten Stromrichtungssinn bekommen, als vor der Abschaltung vom Netz. Der durch remanenten Magnetismus erzeugte Strom würde das Gestell entmagnetisieren; eine Selbsterregung und eine Bremsung würde nicht eintreten. Die Verbindungen zwischen Magnetwicklung und Anker sind vielmehr vor dem Beginn der Bremsperiode, so wie es Fig. 310 angibt, umzuschalten. Nach der darauf beim Einschalten des Widerstandes w erfolgten Schließung des Kreises erregt sich die Maschine, und die Bremswirkung kann je nach Einschaltung von größerem oder kleinerem w geregelt werden.

Eine Ankerbremsung wird bisweilen beim Hauptschlußmotor vermieden, weil sie nicht plötzlich genug eintritt. Häufig wird sie überhaupt vermieden, da eine andere Bürstenstellung am Generator zum funkenlosen Lauf führt, als am Motor. Für einen Motor mit Wendepolen wird diese zweite Einschränkung hinfällig. An Stelle der Ankerbremsung tritt oft, vor allem bei Hebezeugen, eine Bremsung, wie sie in § 22, 3 gekennzeichnet worden ist (Lüftungsbremse), wobei die Spule beim Beginn des Anlassens zur Lüftung des Bremsbandes ein-

geschaltet wird, während der ganzen Antriebsperiode eingeschaltet bleibt, und beim Ausschalten des Motors zur schnellen Stillsetzung der bewegten Teile abgeschaltet wird.

Wird ein Gleichstrommotor (gleichgültig, ob Haupt- oder Nebenschlußmotor) als Hubmotor eines Hebezeuges gedacht, und treibt eine Last bei angeschlossenem Motor den Anker in umgekehrter Richtung, als er durch Strom getrieben werden würde, so ist die durch Induktion im Anker erzeugte Spannung keine EMGK, sondern eine EMK, die also mit der Spannung des Netzes hintereinandergeschaltet ist. Die sinkende Last verursacht daher, was nur bei vorgeschaltetem Anlaßwiderstand in Frage kommt, eine größere Stromaufnahme des Motors, als für den Fall des Stillstandes vorliegen würde. Die Stromstärke stellt sich im Beharrungszustande so ein, daß das treibende Drehmoment gleich ist dem Gegendrehmoment des Stromes, der Strom wirkt also bremsend auf die sinkende Last.

Es sind nach obigem in vielen Fällen eine ganze Reihe von Schaltungen in bestimmter Aufeinanderfolge zur Steuerung eines Motors notwendig, und es erklärt sich daraus, daß in diesen Fällen an Stelle der gewöhnlichen Anlaßwiderstände Steuerschalter erforderlich werden, die mit geeigneter Vorbereitung der Schaltungen durch einfaches Verstellen einer Kurbel oder eines Hebels die Schaltungen in richtiger Reihenfolge erledigen. Diese Steuerschalter werden in einem besonderen Absatz behandelt werden.

Gewöhnliche Handanlasser, die grundsätzlich nur aus einem abgestuften Widerstand mit zugehöriger Kontaktbahn und Kurbel bestehen, kommen an Hauptschlußmotoren selten vor.

B. Zum Nebenschlußmotor.

Das Anlassen des Nebenschlußmotors erfolgt grundsätzlich nach dem Schema der Fig. 311, welche besagt, daß der Anlaßwiderstand nur im Ankerkreise liegen muß, während der Nebenschluß beim Anlassen direkt an das Netz angeschlossen wird. Das Verfahren hat seine Begründung darin, daß ein in die Leitung geschalteter Widerstand die Spannung auch für den Nebenschlußkreis verringern würde, so daß die Magnetwindungen nicht den genügenden Strom führen und nicht das zur Herstellung eines genügenden Drehmomentes erforderliche magnetische Feld erzeugen würden. Ist W_A der (kleine) Ankerwiderstand und W_M der (große) Magnetwicklungswiderstand, so würden W_A und W_M in Parallelschaltung für den stillstehenden Anker in diesem Falle nach den Stromverzweigungsgesetzen ihre Ströme umgekehrt proportional zu den Widerständen einstellen, das Anlaßdrehmoment würde erst bei praktisch nicht in Frage kommenden hohen Ankerstromstärken hergestellt werden.

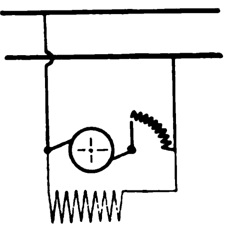


Fig. 311. Grundsätzliches Anlaßschema eines Nebenschlußmotors.

22*

So z. B. würde ein Motor für 100 Volt und 50 Ampere Ankerstrom bei einem Ankerwiderstande von 0,1 Ohm und einem Magnetwicklungswiderstande von 100 Ohm bei unrichtig geschaltetem Anlaßwiderstand und höchstem Ankerstrome einen Nebenschlußstrom von $50 \cdot 0{,}1 : 100 = 0{,}05$ Ampere aufweisen, während dem Nebenschluß 1 Ampere, also das 20-fache zukommt. Der Anker würde daher seinen Strom unnötig groß einstellen müssen, um das entgegenstehende Anlaßdrehmoment zu überwinden.

Das Schema der Fig. 311 könnte sofort verwendet werden unter Anbringung eines Ausschalters in der Zuleitung. Für die Bedienung wäre es dann erforderlich, folgende Reihenfolge einzuhalten: a) Anlassen: 1. Einlegen des Ausschalters bei offenem Anlaßwiderstand, 2. langsames, dem Anlauf des Motors folgendes Vorwärtsbewegen der Anlasserkurbel bis zum unmittelbaren Anschluß des Ankers; b) Ausschalten: 1. Herausziehen des Ausschalters, 2. Auslaufenlassen des Motors, 3. Ausschalten der Anlasserkurbel. Die Reihenfolge unter b hat folgende Begründung:

Die Nebenschlußwicklung darf infolge der schädigenden Wirkungen der Selbstinduktion keine plötzliche Stromunterbrechung erleiden. Der Anker des Nebenschlußmotors läuft, wenn der Strom in der zum Motor führenden Zuleitung unterbrochen wird, durch kinetische Energie getrieben weiter und erzeugt dabei mit der Annahme, daß der Magnetismus erhalten bleibt, einen Pluspol da, wo vorher der Pluspol des Netzes gelegen hatte. Der Nebenschluß ist daher, solange am Anlaßwiderstand nicht unterbrochen ist, noch von einem Strom durchflossen, der nach dem Abschalten vom Netz in der gleichen Richtung auftritt, wie vom Netz aus. Der Magnetismus bleibt daher nach Herausziehen des Ausschalters tatsächlich in der gleichen Richtung erhalten, nimmt aber mit allmählichem Nachlassen der Umlaufsgeschwindigkeit, der EMK des Ankers und des Erregerstromes bis zum Stillstand langsam ab. Als EMK tritt im ersten Augenblick nach der Unterbrechung die Spannung auf, die vorher die EMGK gebildet hatte. Nach dem Auslaufen würde auch die Anlasserkurbel in Ausschaltstellung gebracht werden dürfen, da dann der Erregerstrom zu Null herabgesunken ist.

Die oben angegebene Reihenfolge ist zu wenig einfach für den praktischen Betrieb und man ordnet bei den Handanlassern normal etwa nach Figg. 312 oder 313 an.

Die Zuleitung führt auf der einen Seite (im Schema links) zu der gemeinsamen Klemme von Anker und Magnetwicklung. Auf der anderen Seite führt sie bei Fig. 312 zum Drehpunkt D der Anlasserkurbel K, die so eingerichtet ist, daß sie mit Metallfedern erstens auf der Kontaktbahn des Anlaßwiderstandes und zweitens auf einer Schiene N schleift, an der der Nebenschluß mit dem anderen Ende liegt, und die als Nebenschlußschiene bezeichnet wird. Der der Ausschaltstellung zunächst liegende Knopf der Kontaktbahn ist mit N verbunden, so daß ein unausschaltbarer Kreis aus Anker, Anlaßwider-

stand und Magnetwicklung gebildet wird. Beim Verdrehen der Kurbel liegt der Nebenschluß unter Vernachlässigung eines Zuleitungswiderstandes immer an Netzspannung, während ein der Stellung von *K* entsprechender Teil des Anlaßwiderstandes nur vor den Anker geschaltet ist. Fig. 313 zeigt nur eine andere Anordnung zum Erreichen desselben Zweckes. Der Zuleitungsdraht rechts führt zu der Schiene *S*, die als Stromzuleitungsschiene bezeichnet sei, und auf die die Metall-

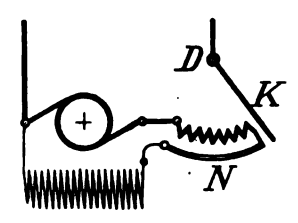


Fig. 312. Normales Anlaßschema eines Nebenschlußmotors (1. Art).

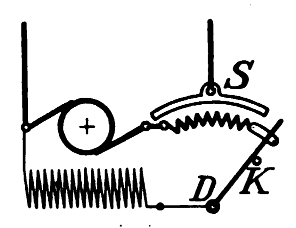


Fig. 313. Normales Anlaßschema eines Nebenschlußmotors (2. Art).

federn der selbst metallisch zu denkenden Kurbel *K* beim Anlassen und in Betriebsstellung fest aufdrücken. Ein zweiter Satz von Kontaktfedern drückt auf die Kontaktbahn des Anlaßwiderstandes, und der Nebenschluß ist an den Drehpunkt *D* der Kurbel angeschlossen. Die Kurbel kann sich in der Ausschaltstellung nicht von dem letzten Kontakt entfernen, und die Ausschaltung wird durch Abgleiten der Kurbel von *S* hergestellt. Verbindet man den im Schema Fig. 313 am weitesten nach rechts liegenden Knopf der Kontaktbahn mit *D*, so steht nichts im Wege, beide Federn der Anlasserkurbel in Ausschaltstellung auf Isoliermaterial ruhen zu lassen.

Durch die Anordnungen nach Fig. 312 oder 313, die als die normalen Anlaßschemata anzusehen sind, werden die Bedienungsvorschriften gegen den früheren Fall wesentlich vereinfacht. Immerhin kommen für die bisher behandelten Schemata noch einige besondere Vorschriften in Frage:

a) Anlassen:

Falls die Zuleitung angeschlossen ist (Sicherung und Ausschalter!), ist die Kurbel langsam dem Anlauf des Motors folgend bis auf den Kontakt zu drehen, der den Anker unmittelbar anschließt (im Schema am weitesten nach links).

b) Ausschalten:

Die Anlasserkurbel ist von der Betriebsstellung aus schnell in die Ausschaltstellung zurückzudrehen.

Die bisherigen Schemata ohne weitere Zutat können nur da angewendet werden, wo der Motor unter ständiger Aufsicht unterwiesenen Personales steht, denn:

1. Es kann der Fall eintreten, daß von der Zentrale her die Stromleitung unterbrochen wird, sei es durch Abbrennen einer Sicherung

oder durch eine andere Betriebsstörung. Bleibt in diesem Falle die Anlasserkurbel in ihrer Betriebsstellung stehen, so entsteht bei Neuanschließen der Leitung ein Kurzschluß, der die Sicherung des Motors oder die neueingesetzte Sicherung im Augenblick des Anschließens in Tätigkeit setzt. Wird der Neuanschluß der Leitung ungeschickt vorgenommen, so treten leicht Handverletzungen dabei auf. Außer diesem Übelstand liegt bei ordnungsmäßigem Wirken der Sicherung zwar keine Gefahr vor, es liegt aber nicht im Sinne des Betriebes, unnötig Sicherungen zu zerplatzen, daher die Vorschrift:

Bleibt der Motor aus unbekannten Gründen stehen, so ist die Anlasserkurbel sofort in Ausschaltstellung zu bringen.

2. Die Kurbel darf, wenn der Anlasser nicht für das Gegenteil eingerichtet ist, nur in voller Betriebsstellung oder in voller Ausschaltstellung stehen bleiben, nicht aber in einer Zwischenstellung, denn die Widerstände gewöhnlicher Anlasser vertragen den dauernden Betriebsstrom nicht (vgl. die Angabe in den Vorbemerkungen dieses Paragraphen).

3. Es kann vorkommen, daß die an sich empfindliche Nebenschlußwicklung eine Unterbrechung oder durch schlechten Kontakt eine solche Stromschwächung erleidet, daß die Umlaufsgeschwindigkeit des Ankers unzulässig hoch wird. Auch in einem solchen Falle ist so schnell wie möglich auszuschalten, da die umlaufenden Teile bei weiterem Anwachsen der Geschwindigkeit durch Fliehkräfte zerstört werden können.

4. Eine Reihenfolge beim Ausschalten bezw. beim Einschalten ist auch bei Anwendung der Schemata Figg. 312 und 313 innezuhalten, da gewöhnlich auch zweipolige Ausschalter und Sicherungen im Motorkreise vorhanden sind. Damit ein nachträgliches Zurückdrehen der Anlasserkurbel nicht vergessen wird, ist es üblich als Norm aufzustellen, daß zuerst die Anlasserkurbel und dann der Ausschalthebel auf Unterbrecherstellung gebracht wird. Da aber eine Ausschaltung am Hebel möglich ist, empfiehlt es sich, immer vor dem Einlegen des Hebels sich von der Ausschaltstellung der Anlasserkurbel zu überzeugen.

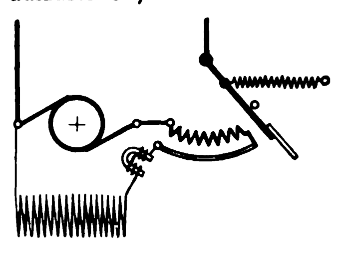


Fig. 314. Normales Anlaßschema eines Nebenschlußmotors mit selbsttätiger Minimalabschaltung.

Diese vier Punkte erledigen sich durch Anwendung des in dem Schema der Fig. 314 ausgedrückten Gedankens:

Ein Elektromagnet liegt im Nebenschlußkreise und hält die Kurbel in Betriebsstellung fest. Aus jeder anderen Stellung wird die Kurbel durch Federkraft in die Ausschaltstellung gezogen. Ein solcher Anlasser bildet daher eine Sicherheitseinrichtung, die es ermöglicht, einen Motor auch ohne Aufsicht laufen zu lassen.

Eine Ausführungsform eines gewöhnlichen Handanlassers zeigt Fig. 315, an der besonders hervorzuheben ist, daß die Platte nach

Lösen von Schrauben zur Seite gedreht werden kann, damit alle Anschlüsse zugänglich werden. Die Abbildung läßt auch die Schaltung erkennen. Vorn unten sind die 3 Klemmen des Anlassers, die erste ist verbunden mit einer Stromzuführungsschiene (vgl. Fig. 313). Die



Fig. 315. Beispiel für den Aufbau eines Anlassers.

zweite ist die Klemme für das freie Nebenschlußende des Motors; von ihr aus führt ein Draht auf die Vorderseite zum Magneten und zur Nebenschlußschiene, die in Fig. 313 durch den Drehpunkt D ersetzt wird, während ein weiterer, auf der Rückseite liegender Draht von der Nebenschlußschiene aus die Verbindung zu dem der Ausschaltstellung zunächst liegenden Knopfe der Kontaktbahn herstellt. Die dritte Klemme vorn unten ist schließlich die Klemme für das mit dem freien Ankerende zu verbindende Widerstandsende des Anlassers.

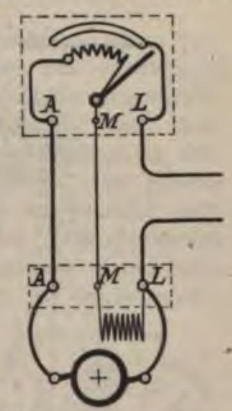


Fig. 316. Anlaßschema mit Hervorhebung der Leitungsführung.

Unter besonderer Hervorhebung der drei Klemmen an Anlasser und Motor, sowie der drei zu beiden Teilen führenden Leitungen, zeigt Fig. 316 die für einen Nebenschlußmotor gültige Schaltung zugleich mit einer vielfach angewendeten Buchstabenbezeichnung der Klemmen.

Zeigt ein Nebenschlußmotor beim ersten Anschließen nicht den gewünschten Drehsinn, so wird der Strom nur im Anker umgekehrt, was in Fig. 316 einer Kreuzung der Bürstenkabel entsprechen würde, während alles andere gleich bleibt; höchstens könnte bei schräg stehenden Bürsten eine Umkehr der Bürstenneigung erforderlich sein, sowie, falls nicht Wendepole vorliegen, eine geringe dem veränderten Drehsinn entsprechende Verstellung der Bürsten.

Außer den bisher besprochenen gewöhnlichen Handanlassern

kommen auch solche in Betracht, mit denen die Umlaufszahl gegen den normalen Fall erhöht werden kann. Die Erhöhung der Umlaufszahl erreicht man mit einem der Magnetwicklung vorgeschalteten (s. Fig. 317) Widerstande R, der das Feld schwächt und die in § 90 behandelten Erscheinungen hervorruft. Unter Anwendung eines solchen Widerstandes muß man entweder auf das Verfahren der bisher erörterten Abschaltung verzichten und den Nebenschlußstrom vor der Unterbrechung durch große bei b in Fig. 318 angedeutete Widerstände schwächen, oder aber Kunstgriffe nach Art der Fig. 319 anwenden (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

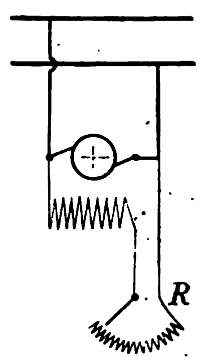


Fig. 317. Widerstand zur Erhöhung der Umlaufsgeschwindigkeit.

Fig. 320 zeigt das Schema eines Wendeanlassers in Verbindung mit dem Motor. Die hier gezeichneten Schienen sind alle metallisch. Der drehbare Teil hat die Gestalt eines zweiarmigen Hebels; beide Seiten des Hebels sind voneinander isoliert. B und B' bezeichnen die Betriebsstellungen für Rechts- bezw. Linkslauf. A bezeichnet die Ausschaltstellung für den Fall, daß von B aus, A' für den Fall, daß von B' aus zurückgedreht wurde. Es ist zu denken, daß an einem Wendeanlasser nach Fig. 320 mechanische Mittel dafür sorgen, daß die Ausschaltstellungen in richtiger Weise getroffen werden. An den mit

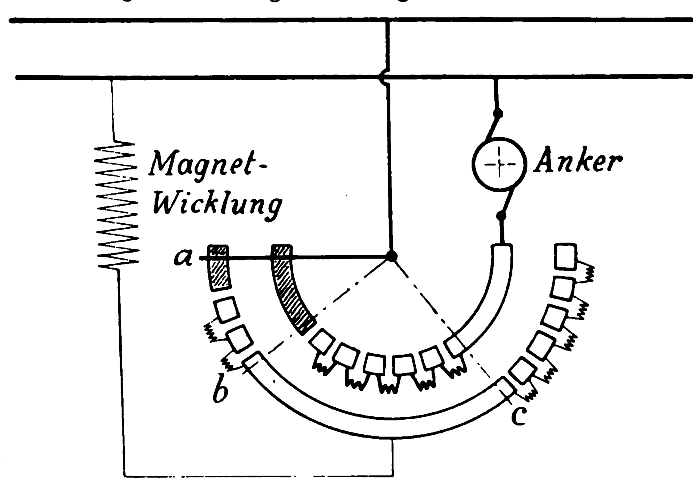


Fig. 318. Anlaßschema mit Vorschaltwiderstand im Nebenschlußkreise.

+ und — bezeichneten Schienen sollen die Pole der Zuleitung liegen. Das Schema baut sich auf dem in Fig. 313 ausgedrückten Gedanken für die funkenlose Abschaltung auf. Die eine Seite des Hebels bewegt sich nur im oberen, die andere nur im unteren Teil. Der

Nebenschluß ist stets im gleichen Sinne durchflossen, während der Ankerstrom gewendet wird.

Die elektrische Bremsung durch den Anker ist beim Nebenschlußmotor bequemer, als beim Hauptschlußmotor, da die Magnetwicklung zu diesem Zweck nicht umgeschaltet zu werden braucht. Der am Netz liegende Nebenschlußmotor, der von außen angetrieben wird, wirkt dadurch, daß seine Umlaufszahl ein wenig gegen den normalen Wert steigt, als Generator und schickt Leistung in das Netz zurück. Der Übergang vom Motor zum Generator

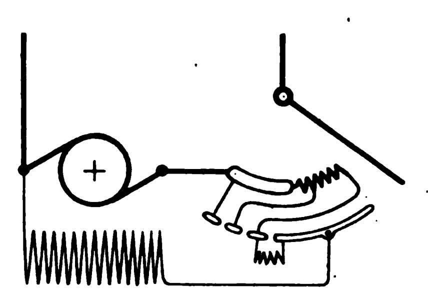


Fig. 319. Anlaßschema mit Vorschaltwiderstand im Nebenschlußkreise.

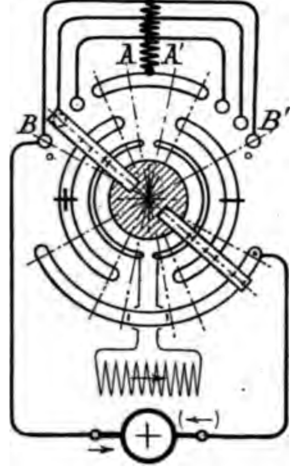


Fig. 320. Wendeanlasser eines Nebenschlußmotors.

geschieht dabei unter Voraussetzung gleichen Umlaufsinnes ohne vorherige Umschaltung. Einen solchen Fall kann man sich verwirklicht denken, wenn man einen Bahnwagen durch einen Nebenschlußmotor angetrieben voraussetzt, der über einen Berg hinwegfährt. Beim Aufwärtsfahren verbraucht der Wagen Strom, beim Abwärtsfahren in derselben Fahrtrichtung gibt er Strom an das Netz zurück. Der Steuerschalter braucht beim Übergang von der Bergfahrt zur Talfahrt nicht aus seiner Betriebsstellung herausgebracht zu werden. Die Steuerung dieser Art würde abgesehen von Sicherheitseinrichtungen nichts mehr als einen normalen Anlasser voraussetzen. Von dieser Art der Bremsung wird jedoch selten Gebrauch gemacht, hingegen kommt die Ankerbremsung zum Stillsetzen umlaufender Massen mehr in Frage.

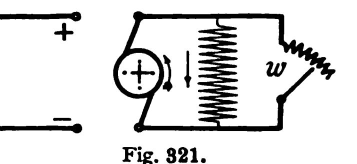


Fig. 321.

Fig. 321 stellt schematisch einen vom Netz abgeschalteten Nebenschlußmotor dar, der nach der Abschaltung durch einen Widerstand *w* belastet sein soll. Je nach Einstellung von *w* wird dem auslaufenden Anker ein schwächerer oder stärkerer Strom entnommen, der den bewegten Massen Leistung entzieht und bei schnellem Abschalten von *w* auch zum schnellen Stillstand führt.

Der Umstand, daß der normal abgeschaltete Motor erregt ausläuft, macht die Anwendung einer solchen Bremsvorrichtung sehr bequem.

An den bisherigen Anlassern wurde eine Bewegung von Hand vorausgesetzt, die jedoch nicht in allen Fällen angewendet werden kann. An Personen- und Warenaufzügen braucht man Anlasser, die

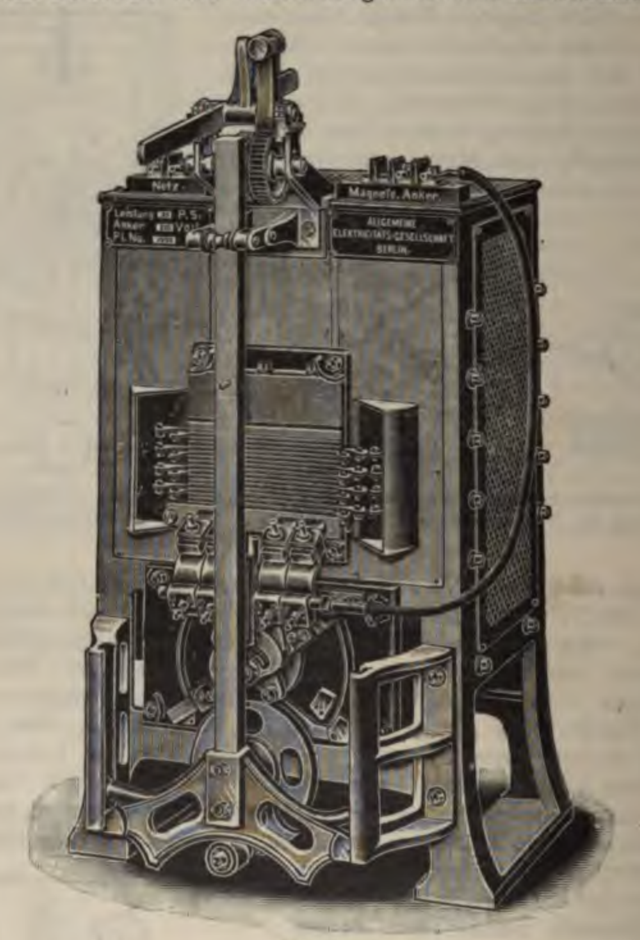


Fig. 322.

durch Auslösung einer mechanischen Einrichtung in Tätigkeit treten, so daß beispielsweise auf einen kurzen Zug an einem Steuerseile die Einschaltung des Motors mit angemessener Zeitfolge betr. die Abschaltung der Widerstände vor sich geht. Anlasser dieser Art, die nur als Wendeanlasser in Verbindung mit elektrischen Bremseinrichtungen in Frage kommen, heißen selbsttätige (automatische) Anlasser.

Ein älteres Beispiel hierfür, das seiner Einfachheit wegen gewählt wurde, ist durch die Abbildung Fig. 322 dargestellt (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

Eine in der Figur vorn liegende, unten mit einem Querstück versehene Schiene ist an einer Führung frei beweglich und ruht mit ihrem Gewicht auf einer Rolle, die an einer durch das Steuerseil zu bedienenden Scheibe angebracht ist. An dieser Schiene befinden sich vier Kohlenbürsten, die in der Abbildung ihre tiefste Stellung einnehmen, die dann erforderlich ist, wenn der Motor sich im Betrieb befindet. Das Metallstück, auf dem sie in der Abbildung aufliegen, ist direkt mit dem Anker verbunden. Von hier aus aufwärts schließt sich ein System von Metall-Lamellen mit dazwischen liegendem Isoliermaterial an. Diese Lamellen sind die Kontakte des Anlaßwiderstandes. Oberhalb der Lamellen ist ein Isolierstück angebracht, auf dem die Bürsten in der Ausschaltstellung ruhen. Bei ausgeschaltetem Motor steht die Rolle, die die Schiene trägt, in höchster Stellung.

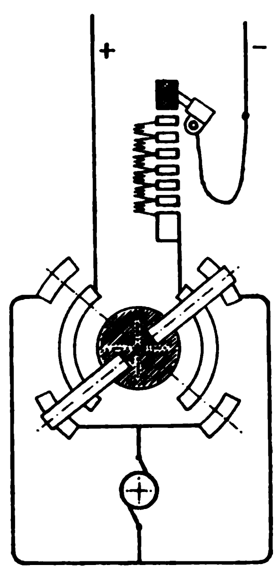


Fig. 323.

Wird nun die Rolle durch das Steuerseil schnell in ihre tiefste Lage gebracht, so wird die Schiene frei und treibt unter dem Einfluß ihrer Schwere ein Räderwerk, das mit einer Hemmung ähnlich einer Uhrhemmung versehen ist. Der oben befindliche und nach vorn reichende Hebel wird durch das Hemmwerk bei der Abwärtsbewegung der Schiene in eine schwingende Bewegung versetzt. Während die Schiene mit den Bürsten ihren senkrechten Weg ausführt, läuft der Motor an.

Je nach dem Wege, auf dem die Rolle in ihre tiefste Lage gebracht wurde (durch Rechts- oder Linksdrehung der Scheibe), wird ein Umschalthebel in die eine oder die andere Lage gebracht. Es wird dadurch eine Umschaltung des Ankers erreicht, die durch die schematische Darstellung Fig. 323 erläutert wird. Der Nebenschluß führt in beiden Fällen die gleiche Stromrichtung.

C. Steuerschalter (Kontroller) für Haupt- und Nebenschlußmotoren.

Unter Steuerschaltern versteht man Einrichtungen, die einen oder mehrere Motoren bei weniger einfachen Betriebsvorgängen durch einfache Bewegungen von Kurbeln oder Hebeln steuern. Sie enthalten meistens eine Steuerwalze, die durch geeignet verbundene Ringe oder Ringteile zusammen mit einer entlang einer Mantellinie angeordneten Kontaktreihe vorbereitete Schaltungen durch Drehen der Walze in bestimmter Reihenfolge herstellt. Da es sich bei den durch Steuer-

schalter bedienten Motoren gewöhnlich um Spannungen in der Nähe von 500 Volt handelt, besitzen die Steuerschalter ein geschlossenes Gehäuse, so daß kein Spannung führender Teil von außen zugängig ist. Da bei diesen Spannungen an den Unterbrecherstellen größere Lichterscheinungen zum Erlöschen gebracht werden müssen, ist die magnetische Ausblasung allgemein zu finden. Die Bläserspule stellt entlang der ganzen Steuerwalze ein magnetisches Feld her, sobald Strom in der Zuleitung fließt. Mehrere hintereinandergeschaltete Unterbrecherstellen erleichtern die Ausschaltung. Zum Sichern der Schaltstellungen enthält der Schalter eine mechanische Einrichtung, gewöhnlich in Form eines Schnapprades mit zugehörigem Hebel.

Entweder besteht die Steuerwalze aus einem Zylindermantel aus Isoliermaterial, auf dem die Ringe oder Ringteile befestigt sind, oder es sind ganze Teile der Steuerwalze aus einem Bronzegußstück hergestellt, wobei die einzelnen Teile voneinander isoliert zusammengesetzt werden. Die Kontaktfedern werden gewöhnlich aufgereiht mit Zwischenlagen isolierender Scheiben, die bis dicht an die Steuerwalze heranreichen, so daß ein Lichtbogen nicht von dem einen Kontakt zum anderen übergehen kann.

Die folgenden Schemata Figg. 324 bis 330 enthalten eine Entwicklung zum Verständnis der Steuerschalter von einfacheren zu zusammengesetzten Schaltvorgängen. Die starken ausgezogenen Striche von Ring zu Ring bedeuten Verbindungen innerhalb der Walze. In allen diesen Figuren, die ihre Erklärung durch die Unterschrift erhalten, sind links die Mäntel der Steuerwalzen mit der Belegung abgewickelt dargestellt, während die Rechtecke seitlich davon die Kontaktreihe schematisch darstellen. Die senkrechten, zum Teil mit Nummern versehenen Strichpunktlinien bedeuten diejenigen Linien, auf denen die Kontaktreihe betriebsmäßig stehen kann. Die gerissene Umrahmung bedeutet eine Begrenzung der Steuerwalzenmantelfläche.

Fig. 327 kann unter Anwendung eines Schneckenvorgeleges mit Selbsthemmung als das Steuerschema eines Hubmotors für Lasthebezeuge gelten. Die beiden untersten Ringe, der Ausschalter für die Magnetwicklung, können fortfallen, wenn der Minuspol des Netzes, wie bei Straßenbahnanlagen üblich, geerdet ist. In diesem Falle würde die Magnetwicklung dauernd an dem geerdeten Minuspol angeschlossen bleiben.

Fig. 330 kann beispielsweise als das Schema für die Steuerung eines Bühnen- oder Katzenfahrmotors an einem Laufkran angesehen werden. Der bei der normalen Abschaltung eines Nebenschlußmotors auftretende in sich geschlossene Kreis ist hier wegen der Stromwendung des Ankers aufgegeben worden. Damit die Magnetwicklung beim Abschalten nicht durchschlägt, ist ihr ein Schutzwiderstand S kurz vor dem Augenblick des Abschaltens parallel gelegt. Beim Übergang von Stellung 0 zu 1 oder -1 ist das kurze zu S gehörende Ringstück schon abgeschaltet, ehe die volle Einschaltstellung zustande gekommen

ist; das Feld tritt also von Anfang an in normaler Stärke auf. Auch der Spule der Lösungsbremse kann (bisweilen geschieht das dauernd) ein Schutzwiderstand parallel geschaltet werden, der nicht zu klein bemessen sein darf, weil dadurch die Geschwindigkeit des Einfallens beeinträchtigt wird. Das andere Mittel gegen Durchschlag der Bremsspule, bestehend aus einer um den Magneten gelegten und in sich geschlossenen Kupferhülse, wirkt ebenfalls hemmend auf das Einfallen der Bremse.

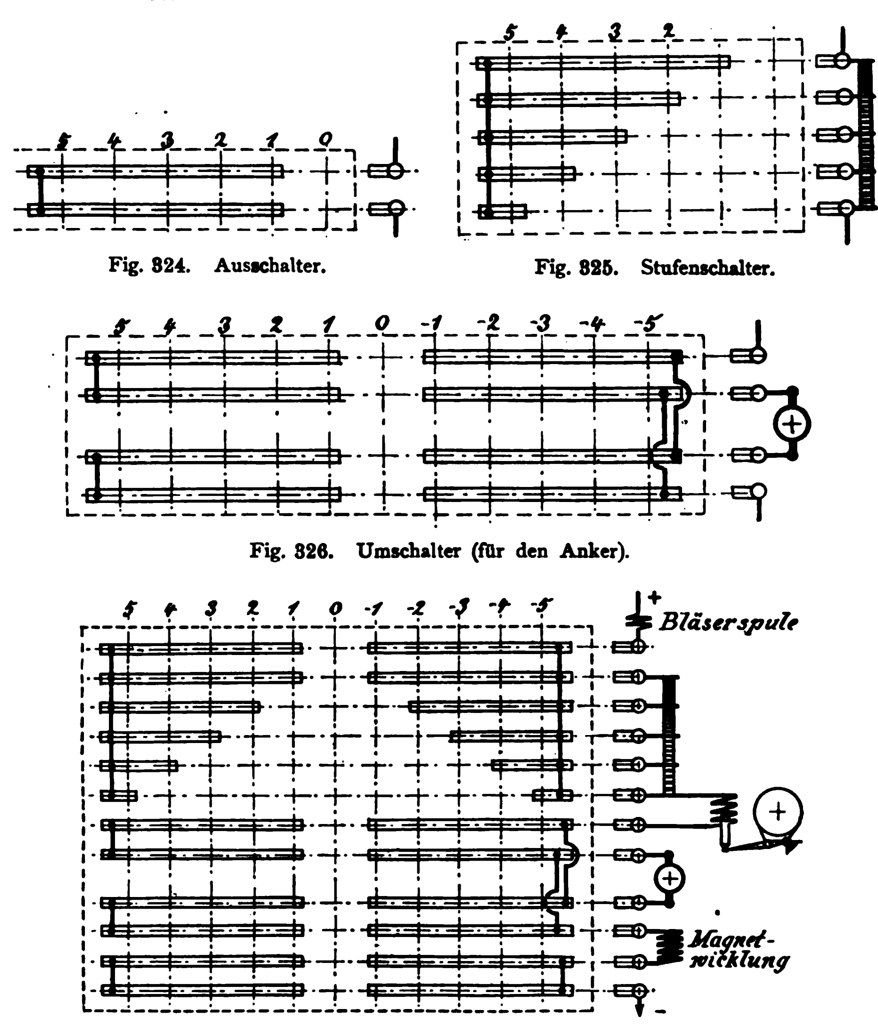


Fig. 324. Ausschalter.

Fig. 325. Stufenschalter.

Fig. 326. Umschalter (für den Anker).

Fig. 327. Schema für den Steuerschalter eines Hauptschluß-Wendemotors mit Hauptschluß-Lüftungsbremse.

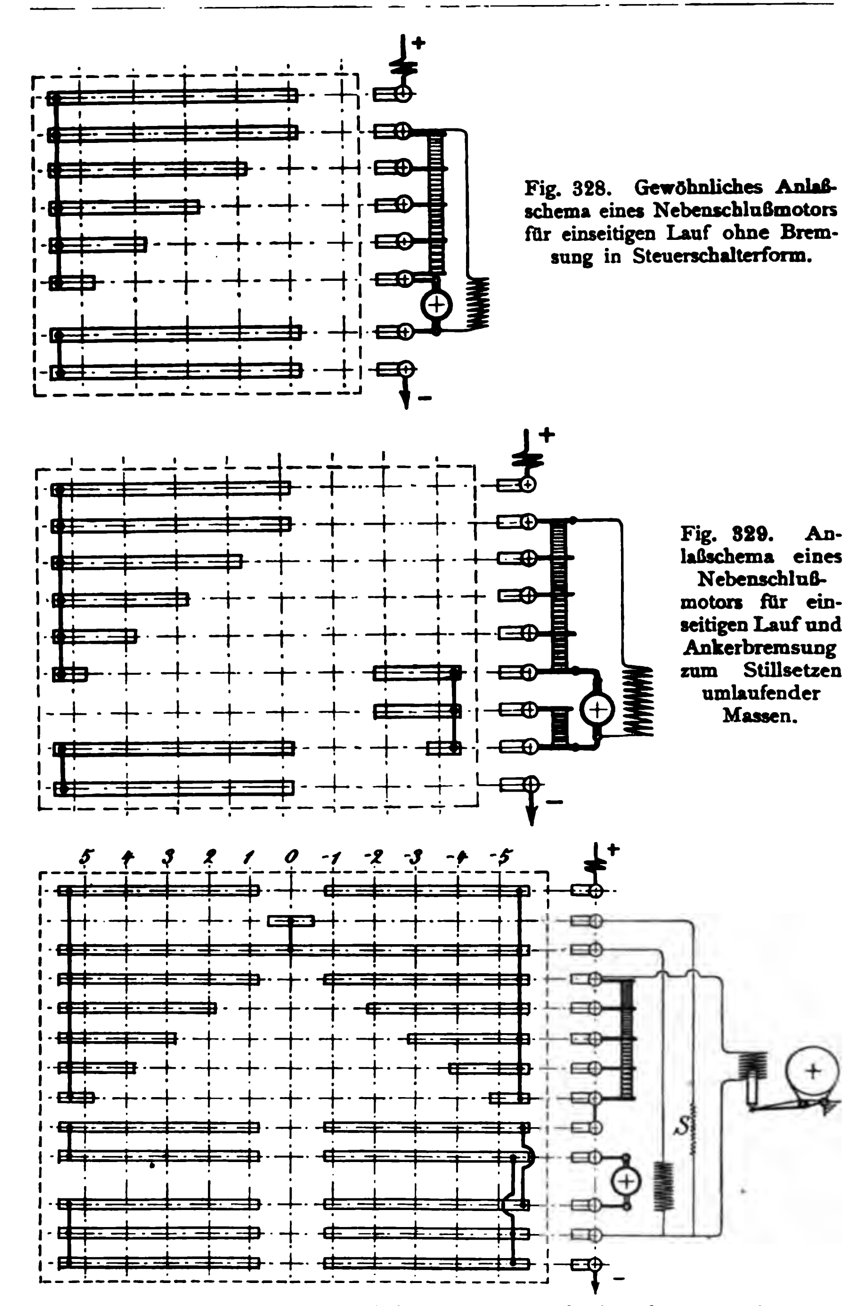


Fig. 328. Gewöhnliches Anlaßschema eines Nebenschlußmotors für einseitigen Lauf ohne Bremsung in Steuerschalterform.

Fig. 329. Anlaßschema eines Nebenschlußmotors für einseitigen Lauf und Ankerbremsung zum Stillsetzen umlaufender Massen.

Fig. 330. Schema für den Steuerschalter eines Nebenschlußwendemotors mit Nebenschluß-Lösungsbremse und Schutzwiderstand (S) für die Magnetwicklung.

D. Beispiel für die Steuerung eines Straßenbahnwagens.

Die Zuleitung des Stromes zu dem Wagen erfolgt durch die mit dem Pluspol der Zentrale verbundene Oberleitung, während zur Rückleitung die Schienen benutzt werden, die an den Minuspol der Zentrale angeschlossen sind. Diese Anordnung hat den Zweck, fremde in der

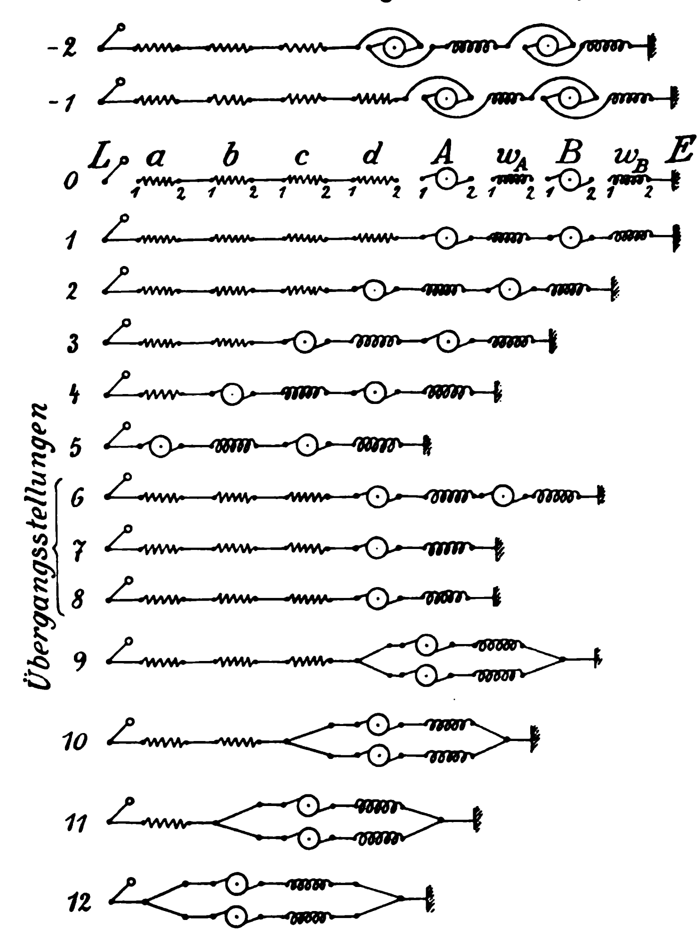


Fig. 331. Schaltfolge für ein Beispiel eines Straßenbahnwagens.

Erde liegende Röhrensysteme (Gas- und Wasserrohre) nach Möglichkeit gegen Zerstörung durch elektrolytische Einflüsse zu schützen. Die Spannung zwischen Oberleitung und Erde beträgt gewöhnlich 500 bis 550 Volt. Infolge der weiten Verzweigung der Schienen in der Erde ist der Minuspol gut geerdet, so daß die Schienen gegen ihre Umgebung keine erhebliche Spannung annehmen können. Zur Strom-

abnahme von der Fahrleitung dienen Rolle oder Bügel. Der Übergang zu den Schienen hin erfolgt durch die Räder.

Der Fahrdraht wird in mehrere Strecken geteilt, deren jede eine besondere Speiseleitung besitzt. Die Widerstände der Speiseleitungen werden angenähert gleich bemessen, so daß bei stärkster Belastung etwa 10 % der Spannung in ihnen verloren gehen. Die einzelnen Strecken sind voneinander isoliert, können aber durch Einlegen von Schaltern miteinander verbunden werden. Andere Schalter gestatten es, die Speiseleitungen an der Übergangsstelle zur Strecke zu unterbrechen. Jede Speiseleitung enthält in der Zentrale einen Maximalautomaten, der hauptsächlich bei Kurzschlüssen unterbricht. Jede Strecke der Oberleitung wird mit Blitzschutzvorrichtungen versehen.

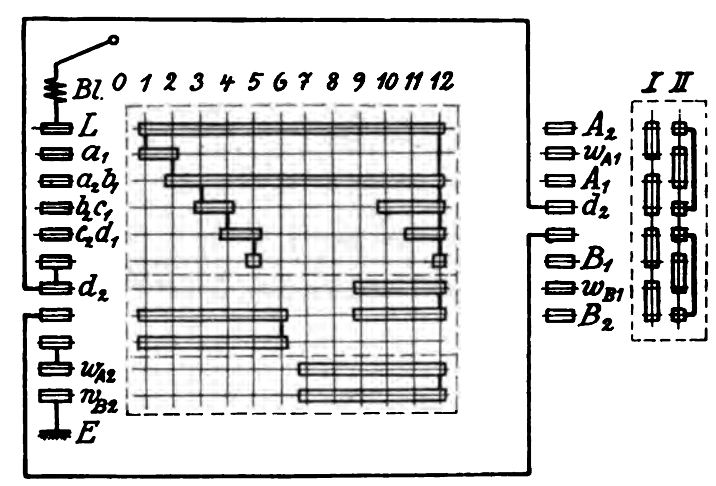


Fig. 332. Beispiel eines Steuerschemas für einen Straßenbahnwagen.

Das vorliegende Beispiel der Steuerung eines Wagens, dessen Schaltfolge durch Fig. 331, und dessen Steuerschema durch Fig. 332 ausgedrückt ist, setzt, wie allgemein üblich, zwei Motoren voraus, die für alle Betriebsstellungen zugleich eingeschaltet sind, und von denen jeder auf eine Wagenachse arbeitet. Die Motoren können zu langsamer Fahrt hintereinander oder zu schneller Fahrt nebeneinander geschaltet werden. Eine Stromwendung im Anker bei hintereinandergeschalteten Motoren wird zur Rückwärtsfahrt benutzt und kann im Notfalle zur Bremsung dienen, während das Bremsen für dieses Beispiel in gewöhnlichen Fällen durch Anziehen einer Handbremse erfolgen muß.

In Figg. 331 und 332 ist die Anschlußstelle an die Leitung mit L, die Anschlußstelle an die Erde mit E angedeutet.

Die vier nur zum Anlassen verwendeten Widerstände sind mit a, b, c und d bezeichnet, die Anker der beiden Motoren mit A und B, die zugehörigen Magnetwicklungen mit w_A und w_B. Mit den kleinen

Zahlen 1 und 2 sind die Anschlüsse der betreffenden Teile verstanden. Bei Stellung 0 ist ausgeschaltet.

Die Schaltungen zur Rückwärtsfahrt sind in Fig. 331 mit — 1 und — 2 bezeichnet. Die übrigen 12 Schaltungen dienen zur Vorwärtsfahrt, wobei aber die Schaltungen 6, 7 und 8 nur kurzzeitig als Übergangsstellungen gebraucht werden und nicht als Betriebsstellungen anzusehen sind. Schaltungen 1 bis 5 zeigen beide Motoren hintereinander, Schaltungen 9 bis 12 beide Motoren nebeneinander.

Der zugehörige Steuerschalter (Fig. 332) besitzt zwei Walzen, von denen die kleinere nur zwei Stellungen (I und II) einerseits zur Vorwärtsfahrt, anderseits zur Rückwärtsfahrt aufweist. Die größere Walze hat außer der Ruhelage 12 Stellungen, die unter Einschaltung von I den Fällen 1 bis 12 der Fig. 331 entsprechen. An den Schleifkontakten der Fig. 332 ist in Übereinstimmung mit Fig. 331 angegeben, an welchen Teilen sie angeschlossen sind.

Durch mechanische Mittel ist dafür zu sorgen, daß die kleinere Umschaltwalze nur verstellt werden kann, wenn die größere sich in Unterbrecherstellung befindet, und daß die größere unter Einschaltung von II nicht über Stellung 2 hinausgelangen kann. Die große Walze kann aus 3 Metallgußstücken zusammengesetzt werden, die soliert aneinander befestigt sind. Die Trennstellen sind in Fig. 332 durch gerissene Linien angedeutet.

§ 94. Rechnungen an Motoren.

A. Die Bilanz.

Im Anschluß an die in § 90 gegebenen Gleichungen und ihre Erweiterungen in § 92 A und B ist für das Verhalten des Motors in bezug auf die Ausnutzung der zugeführten Leistung folgende Gleichung aufzustellen: Unter Berücksichtigung dessen, daß bei einem Motor die an den Klemmen gemessene Leistung die zugeführte Leistung ist, und daß das Produkt aus Ankerstrom und EMGK die auf den Anker nutzbar übertragene Leistung darstellt, von der noch zum Erhalten der abgenommenen Leistung die Verlustleistungen für Hysterese, Wirbelströme und Reibung abzuziehen sind, muß geschrieben werden:

$$E' \cdot I = E'' \cdot I_A + I_A^2 W_A + i_M^2 W_M$$

oder:

$$E' \cdot I = L_2 + I_A^2 W_A + i_M^2 W_M + (L_H + L_W + L_R).$$

Dabei bedeutet:

E' die Klemmenspannung des Motors (Volt),
I der dem Motor zugeführte Strom (Ampere),
E'' die EMGK (Volt),
I_A den Ankerstrom (Ampere),
W_A den Ankerwiderstand (Ohm),
i_M den Strom der Magnetwicklung (Ampere),
W_M den Widerstand der Magnetwicklung (Ohm),

L_2 die an der Achse abnehmbare Nutzleistung (Watt),
L_H den Leistungsverlust durch Hysterese (Watt),
L_W den Leistungsverlust durch Wirbelströme (Watt),
L_R den Leistungsverlust durch Reibung (Watt).

Der Wirkungsgrad ist demnach:

$$\eta = \frac{L_2}{E' \cdot I},$$

wobei zu bemerken ist, daß L_2 durch Bremsung gemessen werden kann. Durch gleichzeitiges Messen von E' und I wird daher η bestimmbar; kommt außerdem noch die Messung der Größen I_A, W_A, i_M und W_M hinzu, so kann auch die Summe $(L_H + L_W + L_R)$ berechnet werden. Es gelten zur Vorausberechnung der Einzelwerte L_H und L_W des Ankereisens die in § 84 gegebenen Ausdrücke, wie bei dem Stromerzeuger.

B. Vorausberechnung des Verhaltens eines Motors unter bestimmten Annahmen.

Die Vorausberechnung eines Motors erfolgt in Anlehnung an das für einen Stromerzeuger in § 84 B gegebene Verfahren, wobei nur entsprechend den Gleichungen von § 90 und § 92 A und B und der an diesen Stellen gegebenen Deutung der Formelgrößen Verschiedenheiten auftreten. Zur Erläuterung seien einige Rechnungen im Anschluß an §84 C und die dort gerechnete Maschine vorgenommen. Die hier folgenden Rechnungen sollen die Vorgänge, die in früheren Paragraphen im wesentlichen qualitativ behandelt wurden, auch in quantitativer Hinsicht in einem Beispiel behandeln, soweit das mit einfachsten Annahmen möglich ist.

Die in § 84 C gerechnete Maschine sei an Stelle der Nebenschlußwicklung mit einer Hauptschlußwicklung versehen. Die beiden Magnetspulen seien mit Kupferdraht von 8,5 mm Außendurchmesser voll bewickelt, so daß $10 \times 10 = 100$ Windungen auf eine Spule kommen. Mit 0,75 mm Dicke der Drahtisolation ist der Kupferdurchmesser 7 mm; der Kupferquerschnitt sei, da verseilter Draht angenommen sein möge, das 0,9-fache der zum Durchmesser 7 mm gehörigen Kreisfläche, so daß der Kupferquerschnitt

$$q_m = 34{,}6 \text{ qmm}$$

zu rechnen ist. Damit beläuft sich der Widerstand der Magnetwicklung (beide Spulen in Hintereinanderschaltung) auf

$$W_M = \frac{2 \cdot 100 \cdot 1{,}27}{34{,}6 \cdot 57} = 0{,}1288 \text{ Ohm.}$$

Außerdem sei an dieser Maschine die doppelte Zahl von Leitern rund um den Anker, also $z = 384$, angenommen, die ebenfalls in 48 Nuten mit 48 Schablonenspulen untergebracht werden, von denen aber jede Spule 4 Windungen besitzt, so daß 8 Drähte in einer Nut zu liegen kommen. Der Ankerdraht habe 2,6 mm Kupferdurchmesser entsprechend einem äußeren Durchmesser von 3 mm und einem Kupfer-

querschnitt $q = 5{,}8$ qmm. Die Länge eines Ankerzweiges wird gegen den früheren Fall von 64 m durch die Verdoppelung der Leiterzahl auf $l = 128$ m gebracht. Der Ankerwiderstand wird hiermit:

$$W_A = \frac{128}{2 \cdot 5{,}8 \cdot 57} = 0{,}212 \text{ Ohm.}$$

Die Summe der Widerstände von Anker und Magnetwicklung beträgt somit:

$$W_A + W_M = 0{,}3408 \sim 0{,}341 \text{ Ohm.}$$

Die im übrigen mit der früheren gleiche Maschine sei als Motor an ein Netz der konstanten Spannung $E' = 120$ Volt angeschlossen. Es ist zunächst zu untersuchen, welche Drehmomente und Umlaufszahlen bei einer Reihe von Stromstärken auftreten.

Zu diesem Zweck wird eine Reihe von Kraftlinienzahlen angenommen und die zugehörige Reihe von Stromstärken bestimmt.

1. Kraftlinienzahl des Kreises (entsprechend $\mathfrak{N}'_1 = 3\,680\,000$) angenommen zu 1 840 000.

   Es ergibt sich (vgl. § 84, C) für diesen Fall die Amperewindungszahl:

$$\mathfrak{Z}_1 = 8030 \text{ AW}$$

   und die Stromstärke:

$$I_1 = \frac{8030}{200} = 40{,}15 \sim 40{,}2 \text{ Ampere.}$$

2. Kraftlinienzahl des Kreises (entsprechend $\mathfrak{N}'_2 = 3\,000\,000$) angenommen zu 1 500 000.

   Es ergibt sich die Amperewindungszahl $\mathfrak{Z}_2$ für diesen Fall:

	$\mathfrak{B}\,(\mathfrak{H})$	$\mathfrak{Z}'$	$\mathfrak{Z}$
Anker . .	8150	3,1	75
Luftr. . .	4438	3635	2908
Pole . . .	12500	20	520
Gestell . .	11360	13,7	1096
			$\mathfrak{Z}_2 = 4599$ AW

   und die Stromstärke:

$$I_2 = \frac{4599}{200} = 22{,}995 \sim 23 \text{ Ampere.}$$

3. Kraftlinienzahl des Kreises (entsprechend $\mathfrak{N}'_3 = 2\,400\,000$) angenommen zu 1 200 000.

   Es ergibt sich die Amperewindungszahl $\mathfrak{Z}_3$ für diesen Fall:

	$\mathfrak{B}\,(\mathfrak{H})$	$\mathfrak{Z}'$	$\mathfrak{Z}$
Anker . .	6580	2,9	70
Luftr. . .	3550	2784	2229
Pole . . .	10000	8,5	221
Gestell . .	9100	6,2	496
			$\mathfrak{Z}_3 = 3016$ AW

und die Stromstärke:

$$I_3 = \frac{3016}{200} = 15{,}08 \sim 15{,}1 \text{ Ampere.}$$

4. Kraftlinienzahl des Kreises (entsprechend $\mathfrak{N}'_4 = 1\,800\,000$) angenommen zu 900 000:

Es ergibt sich die Amperewindungszahl $\mathfrak{Z}_4$ für diesen Fall:

	$\mathfrak{B}$ ($\mathfrak{H}$)	$\mathfrak{Z}'$	$\mathfrak{Z}$
Anker . . .	4890	2,7	65
Luftr. . . .	2666	2120	1696
Pole . . .	7500	4,5	117
Gestell . .	6820	4	320
			$\mathfrak{Z}_4$ = 2198 AW

und die Stromstärke:

$$I_4 = \frac{2198}{200} = 10{,}99 \sim 11 \text{ Ampere.}$$

An Stelle der Kraftlinienzahlen $\mathfrak{N}'$ tritt nun infolge der Ankerrückwirkung am belasteten Motor eine geringere, $\mathfrak{N}$, auf, die weniger einfach zu berechnen ist. Es sei aus Einfachheitsgründen hier die Annahme gemacht, daß

$$\mathfrak{N} = \mathfrak{N}' - c \cdot I$$

gesetzt werden könne, wobei hier $c = 6600$ stehen möge. Mit dieser Annahme wird die auftretende Kraftlinienzahl bei

$I_1 = 40{,}2$ Ampere, $\mathfrak{N}_1 = 3\,415\,000$ Kraftlinien,
$I_2 = 23$ „ , $\mathfrak{N}_2 = 2\,848\,000$ „ ,
$I_3 = 15{,}1$ „ , $\mathfrak{N}_3 = 2\,300\,000$ „ ,
$I_4 = 11$ „ , $\mathfrak{N}_4 = 1\,727\,000$ „ .

Mit diesen Zahlen ergeben sich die mittleren Feldstärken entsprechend einem Querschnitt von 676 qcm unter den Polen:

$\mathfrak{H}_1 = 5050$ Kraftl./qm,
$\mathfrak{H}_2 = 4210$ „ „ ,
$\mathfrak{H}_3 = 3400$ „ „ ,
$\mathfrak{H}_4 = 2555$ „ „ .

Von den 384 Leitern rundum von je 24 cm wirksamer Länge sind 192 hintereinandergeschaltet. Da aber nicht alle im Felde liegen, sondern bei einem Polbogen von 120° nur das 0 666-fache dieser Leiter, ergibt sich als die wirksame Länge eines Ankerzweiges

$$l = 192 \cdot 24 \cdot 0{,}666 = 3070 \text{ cm}$$

und die auf den Anker übertragene Umfangskraft für die einzelnen Fälle:

$$P_1 = \frac{1}{9{,}81} \cdot 5050 \cdot 40{,}2 \cdot 3070 \cdot 10^{-6} = 63{,}5 \text{ kg,}$$

$$P_2 = \frac{1}{9{,}81} \cdot 4210 \cdot 23 \cdot 3070 \cdot 10^{-6} = 30{,}3 \text{ kg},$$

$$P_3 = \frac{1}{9{,}81} \cdot 3400 \cdot 15{,}1 \cdot 3070 \cdot 10^{-6} = 16{,}0 \text{ ,, },$$

$$P_4 = \frac{1}{9{,}81} \cdot 2555 \cdot 11 \cdot 3070 \cdot 10^{-6} = 8{,}8 \text{ ,, }.$$

Von diesen Umfangskräften seien mit Rücksicht auf Hysterese, Wirbelströme und Reibung zur Ermittelung der Nutzkräfte etwa 4 % abgezogen, so daß bei einem mittleren Radius der Ankerwicklung von 12,75 cm folgende Nutzdrehmomente entstehen:

$D_1 = 776$ cm × kg bei 40,2 Ampere,
$D_2 = 371$ „ „ „ 23 „ ,
$D_3 = 196$ „ „ „ 15,1 „ ,
$D_4 = 108$ „ „ „ 11 „ .

Die zugehörigen sekundlichen Umlaufszahlen des an das Netz kurz angeschlossenen Motors erhält man nach dem Ausdruck

$$E'' = \mathfrak{N} \cdot z \cdot n' \cdot 10^{-8}$$

zu

$$n' = \frac{E''}{\mathfrak{N} \cdot z} \cdot 10^8,$$

wobei als E'' die Differenzen zwischen der konstanten Netzspannung und dem Spannungsverlust in Anker und Magnetwicklung und als $\mathfrak{N}$ die zuletzt angegebenen ungestrichenen Werte zu setzen sind.

Mit $W_A + W_M = 0{,}341$ Ohm sind die Spannungsverluste des Motors in den einzelnen Fällen:

$e_1 = 40{,}2 \cdot 0{,}341 = 13{,}7$ Volt,
$e_2 = 23 \cdot 0{,}341 = 7{,}8$ „ ,
$e_3 = 15{,}1 \cdot 0{,}341 = 5{,}1$ „ ,
$e_4 = 11 \cdot 0{,}341 = 3{,}7$ „ .

Bei 120 Volt Klemmenspannung am Motor werden demnach die elektromotorischen Gegenkräfte:

$E''_1 = 120 - 13{,}7 = 106{,}3$ Volt,
$E''_2 = 120 - 7{,}8 = 112{,}2$ „ ,
$E''_3 = 120 - 5{,}1 = 114{,}9$ „ ,
$E''_4 = 120 - 3{,}7 = 116{,}3$ „ .

Es ergeben sich hieraus die Werte:

$$n'_1 = \frac{106{,}3 \cdot 10^8}{3415000 \cdot 384} = 8{,}13 \text{ Umläufe/Sek.},$$

$$n'_2 = \frac{112{,}2 \cdot 10^8}{2848000 \cdot 384} = 10{,}27 \text{ ,, ,, },$$

$$n'_3 = \frac{114,9 \cdot 10^8}{2300000 \cdot 384} = 13,02 \text{ Umläufe/Sek.},$$

$$n'_4 = \frac{116,3 \cdot 10^8}{1727000 \cdot 384} = 17,56 \quad \text{„} \quad \text{„} ,$$

Diesen Werten entsprechen:

$$\begin{aligned} n_1 &= 488 \text{ Umläufe/Min. bei } 40,2 \text{ Ampere,} \\ n_2 &= 616 \quad \text{„} \quad \text{„} \quad \text{„} \; 23 \quad \text{„} \\ n_3 &= 781 \quad \text{„} \quad \text{„} \quad \text{„} \; 15,1 \quad \text{„} \\ n_4 &= 1054 \quad \text{„} \quad \text{„} \quad \text{„} \; 11 \quad \text{„} \end{aligned}$$

Als zweiter Teil der Rechnungen sei das Verhalten dieses Motors, der als Hubmotor eines Hebezeuges zu denken sei, für eine Reihe von Vorschaltwiderständen zu bestimmen, die zugleich auch als Anlaßwiderstände dienen sollen. Die einzelnen hintereinandergeschalteten Teile des Anlaßwiderstandes mögen bemessen sein zu

$$2,25 + 1,41 + 0,88 + 0,55 \text{ Ohm},$$

so daß in Summa für den Vorschaltwiderstand 5,09 Ohm gerechnet seien. Die Gesamtwiderstände des Kreises in den einzelnen Kurbelstellungen des Steuerschalters, zu denen als fünfte diejenige des kurz angeschlossenen Motors kommt, werden daher:

$$\begin{aligned} W_1 &= 2,25 + 1,41 + 0,88 + 0,55 + 0,341 = 5,431 \text{ Ohm,} \\ W_2 &= 1,41 + 0,88 + 0,55 + 0,341 = 3,181 \quad \text{„} , \\ W_3 &= 0,88 + 0,55 + 0,341 = 1,771 \quad \text{„} , \\ W_4 &= 0,55 + 0,341 = 0,891 \quad \text{„} , \\ W_5 &= W_A + W_M = 0,341 \quad \text{„} . \end{aligned}$$

Diesen Widerständen entsprechen die z. T. nicht mehr in Frage kommenden Stromstärken für stillstehenden Anker:

$$\begin{aligned} I_{W_1} &= 120 : 5,431 = 22,1 \text{ Ampere,} \\ I_{W_2} &= 120 : 3,181 = 37,7 \quad \text{„} , \\ I_{W_3} &= 120 : 1,771 = 67,7 \quad \text{„} , \\ I_{W_4} &= 120 : 0,891 = [134,7] \quad \text{„} , \\ I_{W_5} &= 120 : 0,341 = [351,9] \quad \text{„} . \end{aligned}$$

Es ist zu untersuchen, welche Umlaufszahlen bei den oben gerechneten an der Ankerwelle angreifenden Drehmomenten für die fünf Stellungen des Steuerschalters zustande kommen. Die Berechnung der Umläufe erfolgt wie im ersten Teile des Beispieles, nur treten an Stelle von $W_A + W_M$ die mit W_1 bis W_4 bezeichneten Widerstände, so daß folgende tabellarisch geordnete Ergebnisse entstehen, zu denen die Umläufe des kurz angeschlossenen Motors (5. Stellung) wiederholt sind. Diejenigen Fälle, in denen die sich senkende Last den Motor treibt (vgl. § 93 A, S. 339), wo also der umgekehrte Umlaufssinn eintritt, sind durch ein vor die Umlaufszahl gesetztes Minuszeichen ausgedrückt.

Liegt die Last fest, und soll sie gehoben werden, so läuft der Motor bei den betreffenden Schaltstellungen und Drehmomenten, wo negative Umlaufszahlen angegeben sind, nicht an, es muß daher zum Anlauf die nächste Stufe eingeschaltet werden.

Die negativen Umlaufszahlen treten in Wirklichkeit ein wenig geringer auf, als die Tabelle angibt, da in ihr nicht berücksichtigt ist, daß das Drehmoment der Hysterese, Wirbelströme und mechanischen Reibung der umlaufenden Teile beim Senken zur Bremswirkung beiträgt.

Stromstärke Ampere	Drehmoment cm × kg	Schaltstellung No.	Umläufe / Min. im Beharrungszustande
40,2	776	1 2 3 4 5	−449 − 35 224 386 488
23	371	1 2 3 4 5	− 27 257 435 546 616
15,1	196	1 2 3 4 5	259 489 634 725 781
11	108	1 2 3 4 5	546 770 911 998 1054

Über die Widerstandsstufen muß unter Abwesenheit von Selbsthemmung bei schwebender Last im Ausschalten schnell hinweggegangen werden, damit die Lösungsbremse einfällt, und nicht etwa die Last sich vor dem Ausschalten unbeabsichtigterweise senkt. Die Leerlaufsarbeit des Hebezeuges muß unter Verwendung eines Hauptschlußmotors so bemessen sein, daß unzulässig hohe Umlaufszahl ausgeschlossen ist.

Falls überhaupt ein Hauptschlußmotor als Hubmotor angewendet werden soll, ist erst daran zu denken den Organismus des Hebezeuges zu entwerfen, wenn der Motor in obigem Sinne bekannt ist. Es sei auf die Ausgestaltung dieses Organismus hier nicht weiter eingegangen,*

* Näheres über elektrische Steuerung von Hebezeugen s. „A. v. Ernst, Die Hebezeuge“ (Berlin, Jul. Springer).

es sollte das Beispiel nur das Verständnis des motorischen Teiles vertiefen und andeuten, daß in jeder Beziehung der mechanische Teil und der elektrische zueinander passen muß. Eine leichtere Aufgabe liegt vor in bezug auf das Zusammenarbeiten des elektrischen und mechanischen Teiles, wenn das Übertragungsmittel eine Schnecke mit Selbsthemmung ist.

§ 95. Ausführungsfragen zu den Motoren.

Da Gleichstrommotoren in ihrer Einrichtung den Gleichstromerzeugern grundsätzlich in allem gleich sein können, ist eine Verwendung sowohl als Motor wie auch als Generator für eine und dieselbe Maschine möglich. So ist es erklärlich, daß eine Reihe von Typen von den Firmen hergestellt wird, unbekümmert darum, ob sie als Motoren oder als Generatoren dienen werden. Es erklärt sich hieraus weiterhin, daß in bezug auf zulässige Beanspruchung bzw. auf Angabe der Leistung auf dem Leistungsschild zur Ermöglichung einer einheitlichen Beurteilung der Handelsware dieselben Vorschriften seitens des Verbandes deutscher Elektrotechniker gelten, wie für Generatoren. Schließlich gelten daher auch für solche Typen dieselben Behandlungsvorschriften im Falle des Motors, wie im Falle des Stromerzeugers. Es braucht daher für diese drei Punkte nur auf das Kapitel der Stromerzeuger verwiesen zu werden.

Nun unterliegen aber Motoren vielfach anderen äußeren Verhältnissen, als Generatoren: Der Generator befindet sich in einem sauberen, oder wenigstens dem Wetter und Schmutz wenig zugängigen überdachten Raume, während Motoren häufig in diesem Sinne ungünstigeren Einflüssen ausgesetzt sind. Der Stromerzeuger wird vom Maschinisten behandelt, während man nicht erwarten kann, daß jeder Arbeiter, der einen Elektromotor braucht, weiß, was ein Elektromotor ist. Schließlich, der Generator ist eine stationäre Maschine, während der Motor in manchen Fällen Lagenänderungen, heftigen Bewegungen und Stößen ausgesetzt ist; in solchen Fällen kommen Elektromotoren vielfach eben deshalb in Frage, weil die Zuführung der Leistung bequem ist, und weil andere Maschinen die Lagenänderungen nicht vertragen.

Die für Generatoren üblichen Typen kommen daher als Motoren nur in Betracht, wo die äußeren Verhältnisse ähnlich denen der Generatoren vorliegen: in elektrischen Betriebsräumen und in allgemeinen Werkstätten, falls es die Natur des Betriebes gestattet, und falls die nötigen Absperrungsmaßregeln oder Sicherheitseinrichtungen getroffen sind.

Andere Typen sind erforderlich, wo der Motor dem Staub, Schmutz und Regen, sowie der Nähe unsachkundigen Personales ausgesetzt ist. In dem einen Falle werden staub- und regendichte Typen verlangt, in dem anderen solche, bei denen die spannungführenden Teile nicht der Berührung zugängig sind. Schließlich ist auch für die

Lagerkonstruktion und die Befestigung des Motors auf Lagenänderungen und Stöße Rücksicht zu nehmen.*

Die Staub- und Regendichtheit, sowie die Unzugänglichkeit empfindlicher Teile und die Unberührbarkeit spannungführender Teile erreicht man durch Anwendung von Kapseltypen, die dadurch entstehen, daß das Magnetgestell zu beiden Lagern hin kastenförmig zusammengezogen wird. Die Pole ragen von den Wänden dieses Gehäuses aus in das Innere hinein und tragen die Magnetspulen. Auf diese Weise werden der Anker, der Kollektor, die Bürsten und alle Wicklungen eingeschlossen und können nur durch Öffnen von Klappen oder durch Abheben von Teilen des Magnetgestelles zugängig gemacht werden.

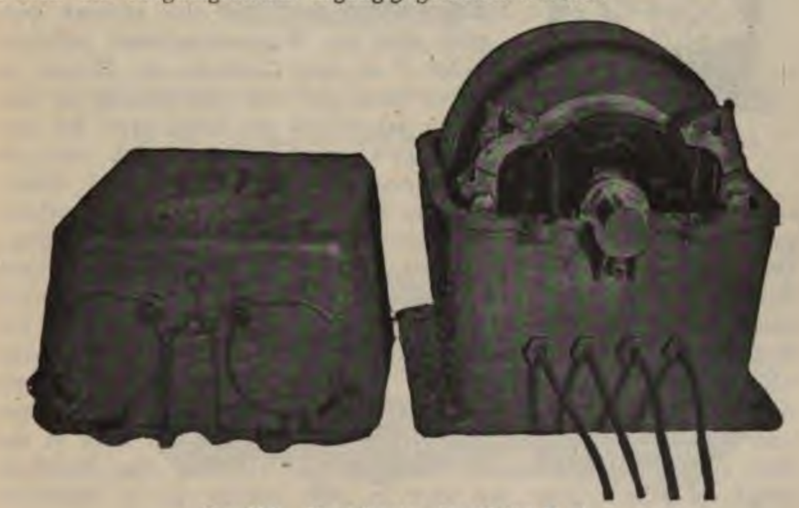


Fig. 333. Kapselmotor der Union E.-G.

Ändern Motoren ihre Lage, oder sind sie Stößen ausgesetzt, so können Ringschmierlager keine Verwendung finden. Das Übliche ist in solchen Fällen gewöhnliche Fettschmierung.

Typen welcher Art für die hier genannten Anforderungen in Frage kommen, mögen zwei Beispiele zeigen:

Fig. 333 stellt einen regen- und staubdichten Motor der Union E.-G. dar, dessen Verwendung zu im Freien stehenden Hebezeugen gedacht ist. Der Typ ist vierpolig unter Anwendung von Folgepolen. Man versteht darunter eine Anordnung, bei der ein Magnetpol um den anderen mit einer Wicklung versehen ist, und zwar gibt jede Spule demjenigen Pol, auf dem sie liegt, die gleiche Polarität. Die dazwischen liegenden Magnetpole entgegengesetzter Polarität entstehen dadurch, daß sich das Magnetgestell bis auf den Luftabstand der übrigen Pole

* Betr. eine ganz besondere Anforderung, die Schlagwettersicherheit elektrischer Einrichtungen in Bergwerken s. Elektrotechnische Zeitschr. 1906, S. 4 ff. (R. Goetze).

dem Anker nähert. Diese Anordnungsweise, die in Anlehnung an Fig. 333 mit Fig. 334 verdeutlicht ist, führt bei vierpoligen Maschinen zu sehr gedrungener Bauart. Bei dieser Kapseltype gestattet die Anordnung zugleich eine elegante Teilung des Gehäuses.

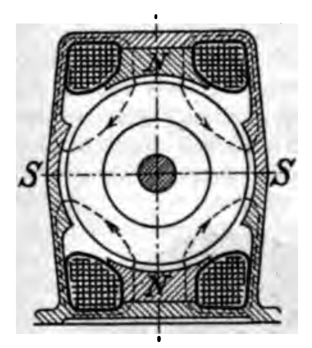


Fig. 334. Folgepole.

Fig. 335 zeigt einen älteren Straßenbahnmotor, der seiner Einfachheit wegen gewählt wurde, halbschematisch dargestellt. Aufhängungsweise und Antrieb entsprechen den auch jetzt noch gültigen Grundsätzen. Er dreht sich bei *A* um die Achse eines Wagenräderpaares. Auf der anderen Seite greift eine am Wagenuntergestell befestigte Feder *F* an dem Gehäuse des Motors an. Durch diese Art der Aufhängung ist dem Motor bei Stößen die Möglichkeit des Ausschwingens gegeben, ohne daß sich die Entfernung zwischen Wagen- und Motorachse ändert. Letztere Bedingung muß erfüllt sein, da ein Stirnräderpaar die Drehung von der Ankerwelle auf die Wagenachse überträgt. Das Ausschwingen des Motors verringert die bei einem Stoß auftretenden Kräfte zwischen Wagenuntergestell und Motor, sowie auch zwischen den einzelnen Teilen des Gestelles und des Motors selbst. Über den Motoren befinden sich im Wagenboden Luken, durch die der Kollektor und die Bürsten nach Abheben eines leichteren Gehäuseteiles zur Abhilfe kleinerer Schäden freigelegt werden können. Das Bloßlegen und Herausnehmen des Ankers erfolgt dadurch, daß ein Bock in den über eine Grube gefahrenen Wagen gestellt wird; an dem Bockholm hängt ein Flaschenzug, den man an dem unteren um *B* drehbaren Teil des Gehäuses angreifen läßt. Nach Anziehen des Flaschenzuges werden die den unteren Teil des Gehäuses tragenden Bolzen (bei *C*) gelöst, und nun kann der Flaschenzug nachgelassen werden. Der obere Teil des Gehäuses bleibt auf der Wagenachse liegen, während der untere beim Nachlassen nach unten aufklappt, so daß der Anker nachgesehen und herausgenommen werden kann. Fig. 336 gibt die Ansicht des geöffneten Motors, der dem Schema Fig. 335 zugrunde liegt, in einer Lage, die zwar im Betrieb nicht vorkommt, die jedoch zur Veranschaulichung beiträgt. Fig. 337 zeigt den Motor geschlossen.

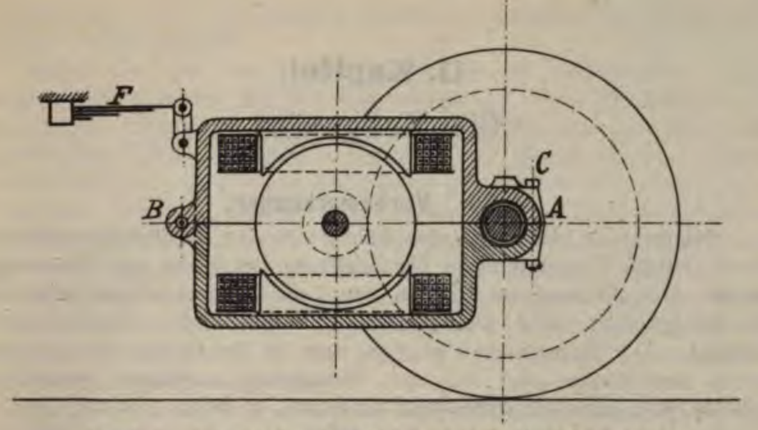


Fig. 335. Schema der Anordnung eines Straßenbahnmotors.

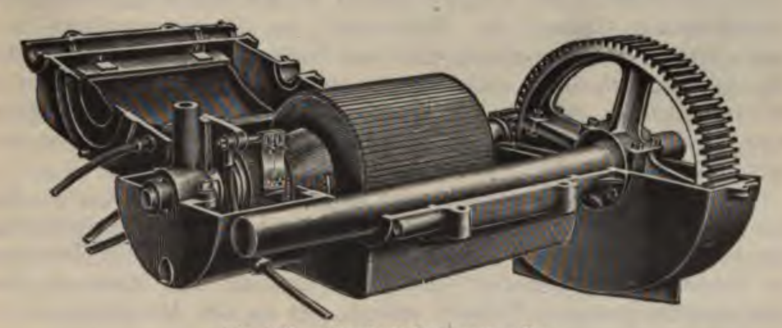


Fig. 336. Straßenbahnmotor offen.



Fig. 337. Straßenbahnmotor geschlossen.

11. Kapitel.

Die Meßgeräte.

§ 96. Vorbemerkungen.

Bekannt ist bisher aus der Lehre von den Meßinstrumenten der grundsätzliche Unterschied in der Schaltung der Strom und Spannungsmesser: Der Strommesser wird in den Leitungsdraht eingeschaltet, der Spannungsmesser wird zwischen zwei Punkten eines Leitersystemes angelegt. Der Strommesser ist von dem in der Anlage vorhandenen Strom durchflossen und soll zur Vermeidung unnötigen Spannungsabfalles einen geringen Widerstand aufweisen, wodurch er wenig Leistung beansprucht. Der Spannungsmesser führt einen schwachem Strom, der proportional zu der zwischen seinen Klemmen vorhandenen Spannung auftritt; er bildet einen Abzweig parallel zu den vom Strom der Anlage durchflossenen Teilen; der Widerstand des Spannungsmessers soll konstant und zur Vermeidung eines unnötigen Stromverlustes groß sein; die Leistungsaufnahme eines Spannungsmessers ist bei schwachem Strome ebenfalls gering. Die Leistung Null würde ein Strommesser vom Widerstande Null, ein Spannungsmesser vom Widerstande unendlich aufweisen.

Ein richtiger Strommesser zeigt in jedem Fall den Strom an, der durch ihn hindurchfließt, ein richtiger Spannungsmesser die Spannung, die an seinen Klemmen liegt. Der Spannungsverlust in der Zuleitung zu einem Spannungsmesser verursacht, daß an den Klemmen des Instrumentes geringere Voltzahl auftritt, als an der Abzweigungsstelle. Gute Spannungsmesser besitzen so hohen Widerstand, daß ihre Zuleitungen in normalen Fällen einen kaum merkbaren Einfluß ausüben.

Sämtliche Stromwirkungen werden zu Meßzwecken herangezogen; die chemische Wirkung dadurch, daß mit ihr Instrumente geprüft werden (vgl. § 23); die Wärmewirkung dadurch, daß dünne Drähte bei Stromdurchgang sich verlängern (Hitzdrahtinstrumente); die magnetischen Wirkungen werden zu Meßzwecken am häufigsten benutzt, und zwar findet die weiteste Verbreitung das Weicheisensystem, welches die Kraftwirkung zwischen Strom und weichem Eisen verwendet. Die Kraftwirkung der Ströme aufeinander benutzen die Dynamometer, Leistungsmesser und Zähler. Hitzdraht-, Weicheisen- und dynamische Instrumente eignen sich grundsätzlich für beide Stromarten, Gleichstrom und Wechselstrom. Nur für Gleichstrom verwendbar sind diejenigen Instrumente, die auf der Kraftwirkung zwischen Stahlmagnet und Strom beruhen. Hierher gehören die Deprez-d'Arsonval-Instrumente (Westonsystem) und die erdmagnetischen Instrumente, die in elektrischen Betriebsanlagen keine Verwendung finden, dagegen im

Laboratorium unter Abwesenheit störender magnetischer Felder verwendet werden können.

Außer der Art der Stromwirkung, die zu Meßzwecken herangezogen wird, ist die Art der Gegenkräfte zu diesen Wirkungen von Wichtigkeit. Üblich ist die Verwendung von Federn, die durch die magnetischen Kräfte gespannt werden, bis das System sich im Gleichgewicht befindet. Besondere Anordnung gestattet die Verwendung der Schwerkraft des beweglichen Systemes als Gegenkraft (Hummelsystem der Weicheiseninstrumente). Die Gegenkräfte sollen möglichst durch äußere Einwirkungen unbeeinflußbar sein, was für gute Federn und für die Schwerkraft zutrifft. Dagegen ist der Erdmagnetismus vor allem in der Nähe von Eisen und magnetelektrischen Maschinen recht veränderlich, und dadurch ist das Bereich erdmagnetischer Instrumente beschränkt und kontrollbedürftig.

Das Ferrarissystem setzt die im letzten Kapitel dieses Lehrbuches behandelten Gegenstände als bekannt voraus und kann daher in diesem Kapitel nicht behandelt werden.

Bei vielen Instrumenten, deren Natur es erfordert, bringt man Feststell(Arretier-)vorrichtungen an. Man versteht darunter Vorrichtungen, die besondere, feine, bewegliche und empfindliche Teile für den Transport so anfassen, daß dem Instrument kein Schaden durch Stöße zugefügt werden kann.

Instrumente können ihrer Ruhelage entweder mit vielen Pendelungen zustreben, oder ihre Einstellung erfolgt mit geringem oder keinem Hin- und Hergang des Zeigers. Einrichtungen, die den Zweck haben unnötige Pendelungen aufzuhalten, heißen Dämpfungsvorrichtungen. Die Dämpfung kann auf mechanische oder elektrische Weise erfolgen, wozu die folgenden Instrumente Beispiele liefern.

Sämtliche in diesem Kapitel der Meßinstrumente vorkommende Rechnungen haben zur Voraussetzung, daß es sich um Gleichstrom handelt, auch wenn die Natur der Instrumente ihre Verwendung bei Wechselstrom zuläßt. Das Gebiet der Wechselströme berührt die Besonderheiten, die bei Wechselstrommessungen zu berücksichtigen sind.

Vorschaltwiderstände von Spannungsmessern für Wechselstrom werden zweidrähtig gewickelt (vgl. § 45, A). In manchen Fällen läßt sich unter dieser Voraussetzung ein und dasselbe Instrument zugleich für Wechselstrom oder Gleichstrom verwenden. Bei Strommessern mit Nebenschlüssen erscheint in bezug auf diesen Punkt Vorsicht geboten.

§ 97. Erdmagnetische Meßgeräte.

Erdmagnetische Instrumente benutzen die Kraftwirkung zwischen Strom und Stahlmagnet als treibende Kraft und den Erdmagnetismus als Gegenkraft.

A. Gewöhnliche Bussolen.

Mit dem Namen Bussolen bezeichnet man solche Instrumente, bei denen eine Anzahl von Windungen um eine Magnetnadel geführt

ist. Man stellt sie so ein, daß die Nadel bei Stromlosigkeit parallel zu den Windungen steht.

Bussolen findet man häufig als Galvanoskope verwendet, man will aus dem Ausschlag der Nadel nur sehen, daß ein Strom fließt, und in welcher Richtung er fließt; sie dienen zu Nullmethoden, wo ein Leiter stromlos werden soll, wie bei der Widerstandsmessung mit der Wheatstoneschen Brücke (vgl. § 36).

B. Das Montagegalvanoskop.

Das Montage-Galvanoskop dient zu rohen Isolationsmessungen. Es ist in Fig. 338 halbschematisch dargestellt. In einem Kasten ist eine kleine Trockenbatterie und eine Bussole untergebracht. Die Magnetnadel befindet sich unten an einer Achse mit einem Zeiger, der oben über einer Skala spielt. Die Bussole enthält zwei Wicklungen, eine grobe und eine feine, welche in Wirklichkeit übereinander liegen. Die Abbildung zeigt sie der Deutlichkeit wegen nebeneinander. Man erreicht durch Anwendung von zwei Wicklungen verschiedene Empfindlichkeit. Schaltet man nun einen sehr großen Widerstand zwischen die Klemme links und eine der beiden Klemmen rechts, etwa zwei Leitungsdrähte, die miteinander keine metallische Verbindung haben, so fließt durch das Instrument ein äußerst schwacher Strom, und die Nadel gibt einen Ausschlag. Letzterer ist um so größer, je weniger gut die Isolation der Leitung ist.

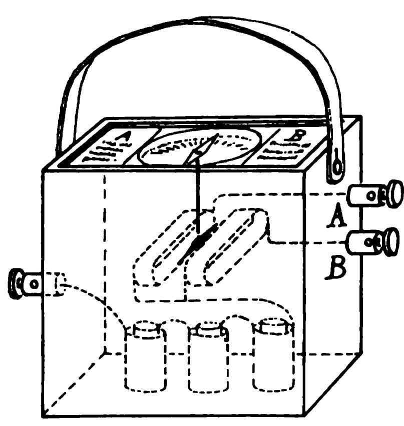


Fig. 338. Montagegalvanoskop.

Nach der Herstellung eines Instrumentes werden sehr große bekannte Widerstände in der angegebenen Weise angeschlossen und in kleinen Tabellen rechts und links vom Zifferblatt zu den betreffenden Widerständen die zugehörigen Ausschläge der Nadel aufgeschrieben. In späteren Fällen kann man mit Hilfe dieser Tabellen aus dem Ausschlag die Größe des Isolationswiderstandes bestimmen. Die eine Tabelle gilt bei Anschluß an Klemme A, die andere bei Anschluß an Klemme B.

C. Die Tangentenbussole.

Um eine Magnetnadel führt ein kreisförmiger, zur Stromführung dienender Metallbügel. Die Magnetnadel befindet sich in der Mitte des Kreises.

Nach § 66 und § 69, B, 1 ist das Feld in der Mitte einer kreisförmigen Stromschleife über einen gewissen Raumteil nahezu homogen und proportional zum Strome. Steht der Bügel in Richtung der Nadel,

d. h. in Richtung des Erdfeldes, so bildet das von dem Strom erzeugte Feld einen rechten Winkel mit dem Erdfeld. Die Nadel ist klein gegen den Metallreifen, damit sie bei ihrer Drehung aus dem Bereich des homogenen Feldes nicht herauskommt.

Wenn Strom im Bügel fließt, so setzen sich die beiden Felder, das Erdfeld und das Feld des Stromes, zu einem resultierenden Feld zusammen. In Richtung des letzteren stellt sich die Nadel ein.

Um zu untersuchen, in welchem Maße der Ausschlag der Nadel von der Stromstärke abhängig ist, zerlegen wir die Kraft, die auf jeden Pol der Nadel wirkt, in ihre beiden Komponenten, was in Fig. 339 geschehen ist. Die Kraft P_E infolge des Erdfeldes $\mathfrak{H}_E$ (Horizontalkomponente) ist:

$$P_E = \mathfrak{m} \cdot \mathfrak{H}_E \text{(in Dyn)};^*$$

die Kraft P_i, herrührend vom Strome $i_{\text{abs.}}$, beträgt:

$$P_i = \mathfrak{m} \cdot \mathfrak{H}_i{}^* = \mathfrak{m} \cdot \frac{2\pi\, i_{\text{abs.}}}{r_{\text{cm}}}^{**} \text{(in Dyn)};$$

dabei bedeutet $\mathfrak{m}$ die Polstärke der Nadel und r den Halbmesser des Reifens. Es ist Gleichgewicht vorhanden für den Fall, daß die Tangente des Ausschlagswinkels α sich darstellt durch:

Fig. 339.

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{P_i}{P_E} = \frac{\mathfrak{m} \cdot 2\pi\, i_{\text{abs.}}}{\mathfrak{m} \cdot \mathfrak{H}_E \cdot r_{\text{cm}}} = \frac{2\pi\, i_{\text{abs.}}}{\mathfrak{H}_E \cdot r_{\text{cm}}};$$

hieraus folgt, daß die Polstärke der Nadel für den Ausschlag ohne Bedeutung ist. Die Stromstärke wird erhalten durch den Ausdruck

$$i_{\text{abs.}} = \frac{\mathfrak{H}_E \cdot r_{\text{cm}}}{2\pi} \cdot \operatorname{tang} \alpha$$

oder

$$i_{\text{Amp.}} = \left(\frac{10 \cdot \mathfrak{H}_E \cdot r_{\text{cm}}}{2\pi}\right) \cdot \operatorname{tang} \alpha;$$

der in Klammer gesetzte Wert bildet für unveränderliches Erdfeld und für denselben Reifen eine konstante Zahl, die als der Reduktionsfaktor R der Tangentenbussole bezeichnet wird. Somit ist:

$$i_{\text{Amp.}} = R \cdot \operatorname{tang} \alpha.$$

Infolge des Umstandes, daß der Strom der Tangente des Ausschlagswinkels proportional ist, hat der Apparat seinen Namen. Die Gesetzmäßigkeit selbst lehrt, daß mathematisch genommen jede beliebige

* Vgl. § 68, H.
** Vgl. § 69, B, 1.

Stromstärke bis zum Werte Unendlich mit dem Apparat gemessen werden kann, da die Werte der Tangente zwischen Null und Unendlich liegen.

Durch Versuch bestimmt man den Reduktionsfaktor durch Hintereinanderschalten des Apparates mit einem bekannten Strommesser oder nach voltametrischer Methode, wodurch i bekannt und α an der Magnetnadel ablesbar ist; R kann demnach berechnet werden. Zugleich mit der Messung von r ist auf diese Weise auch die Horizontalkomponente des Erdfeldes ($\mathfrak{H}_E$) meßbar.

D. Erdmagnetische Galvanometer.

Galvanometer dienen im Laboratorium zu feinen Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessungen. Sie besitzen, wie die Tangentenbussole, einen Magneten, dessen Pole nahe beieinander liegen. Statt einer

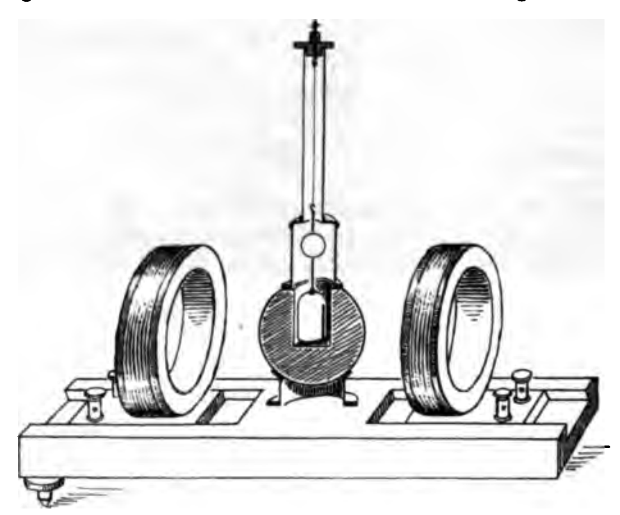


Fig. 340. Erdmagnetisches Galvanometer.

Windung sind viele Windungen um diesen Magneten geführt. Man verwendet je nach dem Zweck der Messung Spulen mit dünnen oder dicken Windungen. Fig. 340 stellt eine Ausführungsform eines erdmagnetischen Galvanometers dar. Die Entfernung zwischen Spulen und Magnet kann zum Erreichen verschiedener Empfindlichkeit verändert werden. Ein Magnet der hier verwendeten Form führt den Namen „Glockenmagnet". Er ist hufeisenförmig und außen abgedreht. Er bewegt sich in der Höhlung eines massiven Balles aus Kupfer, der zur Dämpfung der Schwingungen dient. Mit dem Glockenmagnet bewegt sich sein Kraftliniensystem, welches das Kupfer schneidet und dabei Wirbelströme erzeugt, welche unnötige Schwingungen aufhalten. Ein Draht, an dem der Magnet befestigt ist, trägt einen kleinen runden Spiegel, welcher sich mit dem Magneten dreht. Letzterer ist an einem

dünnen Seidenfaden (Kokonfaden) aufgehängt. Man stellt das Galvanometer so auf, daß bei Stromlosigkeit die Verbindungslinie der beiden Magnetpole parallel zur Windungsebene der Spulen verläuft. Die beiden Spulen zusammen erzeugen ein Feld normal zum Erdfeld. Es liegt hierbei dasselbe Gesetz vor, wie bei der Tangentenbussole

$$i = c \cdot \tang \alpha ,$$

wobei i den Strom in den Windungen, α den Ausschlagswinkel des Magneten und c die Konstante des Galvanometers bedeuten.

Die Ablesung erfolgt gewöhnlich mit Spiegel und Skala. In zwei Meter Abstand von dem Spiegel stellt man eine wagerecht verlaufende Zentimeterskala auf. Über oder unter der Mitte der Skala befindet sich ein Fernrohr. Letzteres wird so eingestellt, daß man bei Stromlosigkeit im Spiegel des Galvanometers die Mitte der Skala sieht, die mit Null bezeichnet sein möge, und von der aus die Zentimeter nach beiden Seiten gezählt werden. Die Skala steht rechtwinklig zur Fernrohrachse. Sobald das Galvanometer einen Ausschlagswinkel α (Fig. 341) zeigt, sieht man im Spiegel eine Stelle der Skala, die in der Abbildung mit A bezeichnet ist. Wie diese Grundrißfigur angibt, liest man von Null bis A Werte ab, welche der Tangente des doppelten Ausschlagswinkels entsprechen. Für kleine Winkel sind die Ausschläge an der Skala gemessen proportional zur Stromstärke zu setzen, für größere Winkel muß man das Ergebnis durch Rechnung korrigieren.

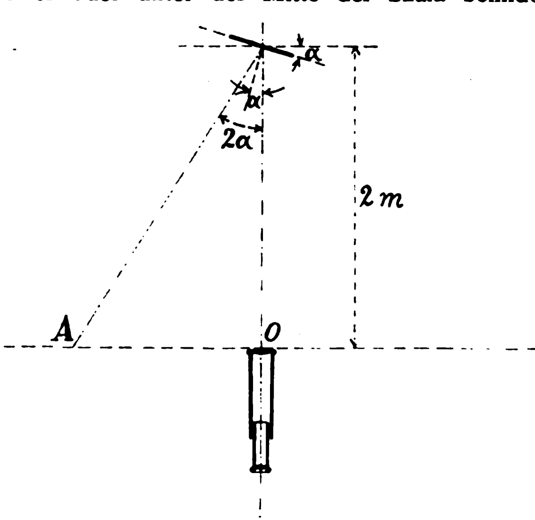


Fig. 341. Schema der Fernrohrablesung.

Man schickt für genaue Messungen den Strom erst nach der einen, dann nach der anderen Richtung durch die Spulen und nimmt aus den Ausschlägen den Mittelwert.

§ 98. Weicheiseninstrumente.

Ein in der Nähe einer Stromspule befindlicher Weicheisenteil wird durch den Strom magnetisiert. Die zwischen ihm und den Stromwindungen auftretende Kraft ist die treibende Kraft der Weicheisen-

instrumente. Die Gegenkräfte sind je nach den Systemen verschieden hergestellt. Da der Strom den Weicheisenteil selbst magnetisiert, tritt die Kraftwirkung in beiden Stromrichtungen in dem gleichen Sinn hervor. Sie ist proportional zu einem Produkt, das sich aus dem Quadrat des Stromes und einem veränderlichen Faktor zusammensetzt, der deshalb auftritt, weil die magnetische Dichte im Eisen nicht proportional zum äußeren Felde ist. Der Charakter der verwendeten Wirkung ist in jedem Fall quadratisch. Die Wirkung kann daher zur Messung von Gleichstrom und Wechselstrom herangezogen werden. Die Instrumente dieser Art können nur erfahrungsmäßig durch Vergleich mit vorhandenen Instrumenten ihre Skala erhalten. Störend für genaue Messungen ist sowohl bei Gleichstrom, wie auch bei Wechselstrom die Hysterese des Eisens. Der Fehler kann nur durch Verwendung geeigneten Eisenmateriales klein gehalten werden. Er äußert sich darin, daß die Instrumente bei zurückgehendem Strome höhere Stromstärken angeben, als wenn man über dieselbe wirkliche Stromstärke mit steigender Amperezahl hinweggeht. Daß der Mittelwert aus beiden Stellungen für Wechselstrom gelte, ist nicht streng richtig. Immerhin genügt die erzielte Genauigkeit dieser Instrumente für die Praxis, und man kann auch erreichen, daß ein und dasselbe Instrument für Gleichstrom und Wechselstrom benutzt werden kann. Erforderlich ist für die Verwendung bei Wechselstrom jedoch stets, daß gegen Auftreten von Wirbelströmen gesorgt ist, die bei den fortwährend wechselnden Kraftlinien dauernd vorhanden sind, wenn Metallteile an verschiedenen Stellen von verschiedener Kraftliniendichte durchsetzt werden. Sie würden störende Wärme erzeugen, dadurch die erforderliche Leistungszufuhr zum Instrument erhöhen und zu fehlerhafter Einstellung des Instrumentes beitragen. Man vermeidet sie durch Verwendung von sehr dünnem, geblättertem Eisen oder bei Zylindermänteln aus Eisenblech durch einen Längsschlitz. Spulenhülsen müssen entweder aus Isoliermaterial bestehen oder, wenn sie aus Metall hergestellt sind,* bis zur Höhlung durch einen Sägeschnitt aufgetrennt werden. Die niedrige erzeugte Induktionsspannung, die im Maximum am Metall neben dem Sägeschnitt herrscht, ist ohne Einfluß auf das Instrument, störend würde nur die in der Spulenhülse induzierte Stromstärke werden.

A. Die Weicheiseninstrumente nach Kohlrausch.

Die Weicheiseninstrumente nach Kohlrausch gehören zu der Gruppe von Instrumenten, bei denen ein Eisenkern axial in eine Spule gezogen wird. Will man nach diesem Verfahren brauchbare Instrumente erhalten, so hat man außer den oben angegebenen Punkten konstruktionelle Feinheiten zu beachten, die an dem folgenden Beispiel des Kohlrauschstrommessers angedeutet sind.

Die Abbildung Fig. 342 zeigt ein solches Instrument schematisch

* Transformator mit einer in sich geschlossenen Sekundärwindung! (S. § 67, 7. Versuch, und § 118).

im Schnitt, Fig. 343 die äußere Form. Die Gegenkraft wird erzeugt durch Spannen einer Feder *f* (Fig. 342) mit Hilfe der magnetischen Kräfte. Diese Feder ist nicht fortlaufend gewunden, sie kehrt vielmehr in der Mitte um, damit der Eisenkern sich bei der Bewegung nicht dreht. Eine Drehung würde ein Schleifen des Zeigers in seinem Spalt, der aus Fig. 343 zu erkennen ist, veranlassen und damit die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigen.

Die Dämpfung des Instrumentes geschieht unter Anwendung eines hohlen Eisenkernes, der oben geschlossen ist. In die Höhlung ragt

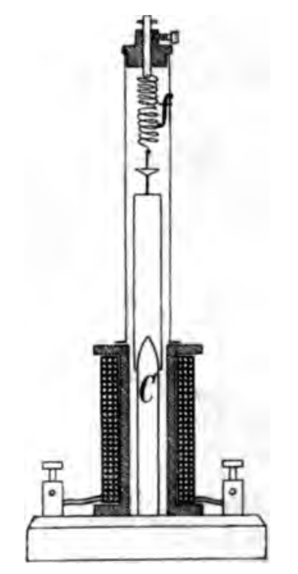


Fig. 342. Schema zum Kohlrauschstrommesser.

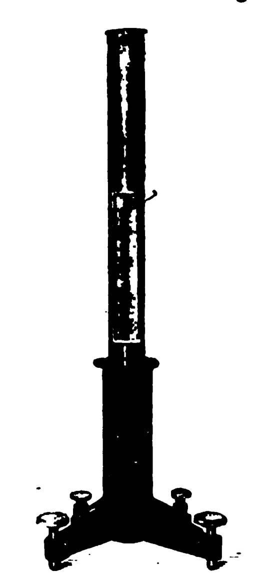


Fig. 343. Kohlrauschstrommesser.

ein Zylinder *C* aus dünnem Metall, der mit geringem Spiel in den Hohlraum paßt. Wird das Instrument angeschlossen, so wirkt diese Anordnung als Luftdämpfung und der Zeiger kommt schnell zu Ruhe. Durch geeignete Anordnung von Spule und Eisenkern ist dafür gesorgt, daß die Skala des Instrumentes über ein gewisses Bereich angenähert gleichmäßige Abstände von Ampere zu Ampere aufweist. Die Nullstellung des Zeigers kann mit Hilfe einer Schraube oben am Instrument geregelt werden.

B. Die Weicheiseninstrumente System Hummel.

Ein im Innern einer Spule außerhalb der Spulenachse befindlicher Weicheisenkörper steht unter dem Einfluß einer radial zu den Windungen hin gerichteten Kraft, die dadurch auftritt, daß der größere Teil der Kraftlinien sich nach derjenigen Seite schließt, wo der magnetische Widerstand infolge der kürzeren Luftstrecke am geringsten

ist. Die hier gekennzeichnete Radialkraft ist die treibende Kraft des Instrumentes, während als Gegenkraft eine Komponente der Schwerkraft des Zeigersystemes verwendet wird. Der Weicheisenkörper in Form einer Fahne F (Fig. 344) ist mit der Achse A drehbar und so angeordnet, daß er sich bei Drehung im Sinne des eingezeichneten Pfeiles den Windungen nähert. An A befestigt ist der Zeiger Z des Instrumentes. Das aus Z, A und F bestehende physikalische Pendel habe seinen Schwerpunkt bei S. Der Schwerpunkt eines Pendels in der Ruhelage befindet sich senkrecht unter dem Aufhängepunkt, so wie das Fig. 344 darstellt.

Wirkt dagegen außer der Schwerkraft zugleich eine magnetische Kraft, die die Fahne zu den Windungen hin zu bewegen bestrebt ist,

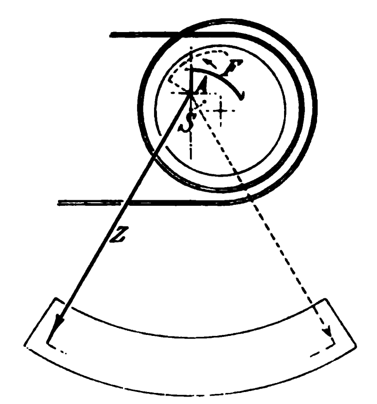


Fig. 344. Schema zum Hummelinstrument.

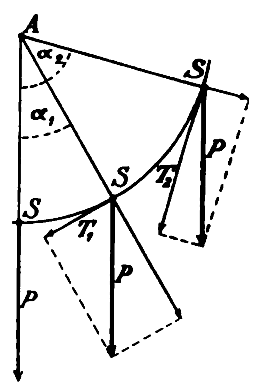


Fig. 345. Kräftezerlegung am Hummelinstrument.

so übt eine Kompenente dieser Kraft ein Drehmoment auf das Pendel aus. Der Schwerpunkt S wird auf einer Kreisbahn gehoben (Fig. 345), und es entwickelt sich dabei eine mit zunehmendem Ausschlagswinkel α bis zu 90^0 größer werdende Tangentialkomponente T der Schwerkraft P. Diese Tangentialkomponente gibt das Gegendrehmoment zu dem magnetischen. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn beide Drehmomente gleich groß sind. Bei geeigneter Anordnung erhält man für bestimmte Teile der Skala nahezu gleichmäßige Einteilung; dagegen sind die Skalen zum Nullpunkt hin nie brauchbar; gewöhnlich erstreckt sich das Meßbereich der Instrumente etwa über $^2/_3$ des gesamten, so daß z. B. ein Strommesser für 30 Ampere eine Skala von 10—30 Ampere aufweist. Instrumente zur Messung sehr hoher Amperezahlen erhalten gewöhnlich eine Spule bestehend aus einer einzigen Windung (aufgeschlitzter Teil aus gegossenem Kupfer). Spannungsmesser besitzen Spulen aus vielen dünnen Windungen, denen ein hinter dem Instrument angebrachter dünndrähtiger Widerstand vorgeschaltet ist.

Instrumente dieser Art sind in den Betrieben weit verbreitet. Sie

sind billig, und ihre Angaben sind für technische Zwecke genügend scharf, selbst für längeren Gebrauch. Man stellt ihre Skalen her durch Vergleich mit anderen Instrumenten. Die Einstellung ist bei Strömen, die nicht schwanken, gut ablesbar, dagegen pendelt der Zeiger bei Stromschwankungen auffällig hin und her. Eine wirksame Dämpfung ist schwer daran anzubringen.

Die Instrumente dieses Systemes können nur ortfest verwendet werden und müssen genau aufgestellt sein, so daß der Zeiger bei Stromlosigkeit auf dem Nullstrich steht; auch von der Seite gesehen ist senkrechte Aufstellung erforderlich. Eisenteile und Magnete in der Nähe dieser Instrumente sind zu vermeiden.

C. Weicheiseninstrumente in Dosenform mit Federn.

Weicheisenkräfte rufen, häufig unmittelbar, eine Drehung des Zeigersystemes hervor, wobei jedoch die Gegenkräfte durch Spannen einer Feder, gewöhnlich einer feinen aus Bronze hergestellten Spiralfeder, auftreten. Die beweglichen Teile der Instrumente dieser Art können genau gegen Schwerkraft ausgeglichen sein, so daß die Verwendung dieser Instrumente in jeder Lage möglich wird.

§ 99. Hitzdrahtinstrumente.

Ein sehr dünner Draht, gewöhnlich aus Platinsilber, wird durch eine Feder gespannt gehalten. Wird der Draht von Strom durchflossen, so dehnt er sich durch die Wärme aus und verändert dadurch die Zeigerstellung. Die vom Strom entwickelte Wärme ist dem Quadrat des Stromes, dem Widerstand des Drahtes und der Zeit proportional. Die Temperatur eines soeben angeschlossenen Drahtes wird daher zunächst steigen bis zu dem Fall, daß die im Draht entwickelte Wärmemenge gleich ist der vom Draht an die Umgebung abgegebenen Wärmemenge. Wäre der Draht dick, so würde dieser Beharrungszustand erst nach längerer Zeit eintreten. Im Interesse einer sofortigen oder baldigen Ablesung müssen daher dünne Drähte verwendet werden, denn die Instrumente sollen auch nach Möglichkeit die vorhandenen Schwankungen anzeigen.

Da die sekundlich entwickelte Wärmemenge dem Quadrat des Stromes proportional ist, sind Hitzdrahtinstrumente für Wechselstrom und Gleichstrom verwendbar. Sie haben den Nachteil, daß sie eine zeitliche Nachwirkung aufweisen, indem ein lange mit dem gleichen Strom angeschlossenes Instrument in geringem Maße steigende Werte anzeigt; dementsprechend geht das Instrument, plötzlich stromlos gemacht, auch langsam zu seiner Nullstellung zurück. Kurzzeitige Stromschwankungen werden von Hitzdrahtinstrumenten in verringertem Maße angezeigt.

Die Legierung Platinsilber* verwendet man, weil sie in bezug auf ihre Festigkeits-, Widerstands- und Wärmeausdehnungsverhältnisse, sowie

---

* Heraeus, Hanau.

durch ihre Unveränderlichkeit am günstigsten ist. Hitzdrahtinstrumente erhalten ihre Skala erfahrungsmäßig durch Vergleichen mit Normalinstrumenten.

A. Spannungsmesser System Cardew.

Der Umstand, daß der Draht dünn sein muß, und der weitere Umstand, daß man den Draht gern lang verwendet, damit bei der zulässigen Temperatursteigerung (etwa 150 Grad) genügende Längenänderung herauskommt, führt zu Instrumenten mit großem Widerstand

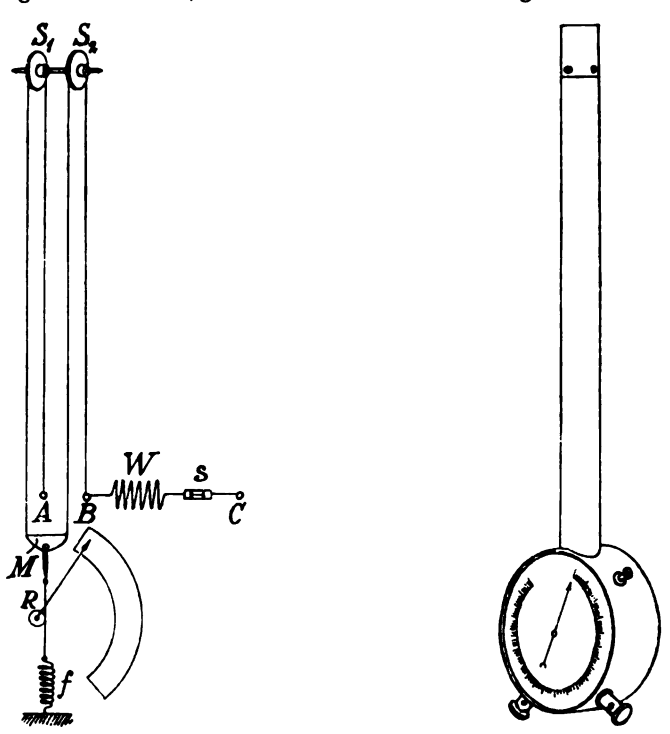


Fig. 346. Schema eines Cardewspannungsmessers.

Fig. 347. Äußeres eines Cardewspannungsmessers.

für sehr schwache Ströme, also zu Spannungsmessern. Das erste System, das in der Technik bekannt wurde, war das Cardewsystem, für das Fig. 346 das Schema gibt, während Fig. 347 das Äußere andeutet. Die Punkte A und B sind fest. Von A aus verläuft ein Draht über eine Scheibe (S_1) zu einem Metallstück M; von letzterem aus geht ein zweiter Draht abermals über eine Scheibe (S_2) zum Punkte B. Die Scheiben S_1 und S_2 sitzen isoliert auf einer Welle, welche zwischen Spitzen drehbar ist. Vor den Draht ist ein großer Widerstand W und eine Sicherung s geschaltet; A und C bedeuten die Klemmen des Instrumentes. Von M aus führt unter Zwischenschaltung eines Seiden-

fadens ein dünner Draht über eine Rolle *R*, welche mit dem Zeiger in Verbindung steht. Am Ende dieses dünnen Drahtes greift eine Feder *f* an, welche das ganze System spannt. Ist nun der Draht zwischen *A* und *B* von Strom durchflossen, so dehnt er sich aus, die Feder *f* gibt nach, und der Zeiger dreht sich.

Die Nullstellung des Zeigers kann durch eine Schraube geregelt werden, welche die Punkte *A* und *B* verschiebt. An dem Widerstand *W* kann man die Zeigerstellung vor dem Herstellen der Skala regeln. Ein Nachteil der Cardewspannungsmesser besteht in dem Schwirren des Zeigers, das durch Wirbelung der aufwärtssteigenden erwärmten Luft in dem senkrechten Rohr hervorgerufen wird. Der große Platzbedarf der Instrumente ist ebenfalls ungünstig.

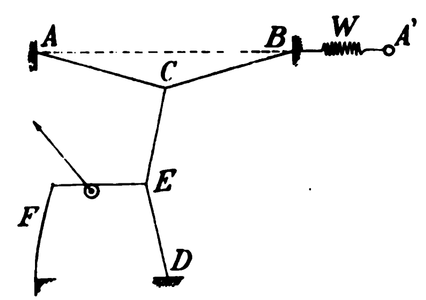


Fig. 348. Schema eines Hitzdraht-Spannnungsmessers von Hartmann & Braun.

B. Die Hitzdrahtinstrumente von Hartmann & Braun.

Die Firma Hartmann & Braun fertigt Hitzdrahtinstrumente, bei denen die Anwendung eines langen ausgespannten Drahtes vermieden ist. Man spannt einen kürzeren Hitzdraht nach Fig. 348 zwischen zwei festen Punkten *A* und *B* ein. In seiner Mitte greift ein zweiter Draht *CD* an; *D* ist ebenfalls ein fester Punkt. Bei *E* greift ein Faden an, der über eine Rolle geführt ist, und der durch eine Feder *F* gespannt wird. Auf der Achse dieser Rolle sitzt der Zeiger. Dehnt sich der Hitzdraht bei Stromdurchgang aus, so legt der Punkt *C* normal zur Verbindungslinie *AB* einen größeren Weg zurück, als die Ausdehnung des Drahtes beträgt. Gibt *C* nach, so weicht *E* abermals in vergrößertem Maße zur Seite aus. Es wirkt der doppelte Knick der Drähte wie eine feine, aber veränderliche Hebelübersetzung.

Bei Spannungsmessern schaltet man einen großen Widerstand *W* vor den Hitzdraht, so daß die Punkte *A* und *A'* in Fig. 348 als Klemmen des Instrumentes anzusehen sind. Bei Strommessern hingegen verfährt man nach Fig. 349: man schaltet einen sehr geringen Widerstand *w* von großem Querschnitt parallel zum Hitzdraht. Letzterer führt dann nur einen sehr kleinen, aber einen bestimmten Bruchteil der gesamten Stromstärke.

Durch die Veränderlichkeit des Übersetzungsverhältnisses kommt es heraus, daß bei einer Wirkung proportional zum Quadrat des Stromes* Skalen erhalten werden, die über gewisse Teile angenähert gleichmäßige Einteilung besitzen.

* Das gilt für die sekundlich erzeugte Wärme; die Temperatur in den Beharrungszuständen verfolgt ein komplizierteres Gesetz.

Auf der Zeigerachse sitzt eine Aluminiumscheibe, welche aus der äußeren Ansicht eines solchen Instrumentes, Fig 350, zu erkennen ist. Die Scheibe dreht sich bei der Bewegung des Zeigers durch das Feld eines Stahlmagneten; es entstehen in der Scheibe dadurch Wirbelströme, welche dämpfend wirken.

Die Verwendung einer Grundplatte aus einem Material, das denselben Temperaturausdehnungskoeffizienten, wie Platinsilber, hat,

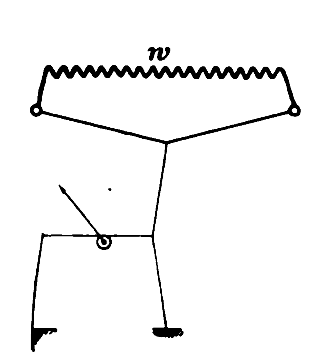


Fig. 349. Schema eines Hitzdraht-Strommessers von Hartmann & Braun.



Fig. 350. Äußeres eines Hitzdraht-Strommessers von Hartmann & Braun.

vermeidet, daß Störungen durch verschiedene äußere Temperaturen hervortreten. Eine Schraube, die einen der Einspannpunkte des Hitzdrahtes verändert, gestattet ein erneutes Einstellen auf Null, falls das nach längerem Gebrauche nötig werden sollte.

§ 100. Das Drehspulensystem (Deprez und d'Arsonval) (Weston).

Von Deprez und d'Arsonval rührt ein Galvanometer her, bei dem eine Spule zwischen den nach oben gerichteten Schenkeln eines Stahlmagneten so aufgehängt ist, daß die Windungsebene parallel zu der durch die Schenkelachse gebildeten Ebene verläuft (Fig. 351). Die Spule hängt an einem dünnen, am Befestigungspunkt und an der Spule festgeklemmten oder festgelöteten Draht. Er dient zugleich zur Stromzuleitung, während ein zweiter, nach unten führender dünner Draht den Strom weiterleitet. Mit der Spule dreht sich ein Spiegel, der zur Ablesung mit Fernrohr und Skala gebraucht wird. Auch haben Deprez und d'Arsonval innerhalb der Spule einen feststehenden zylindrischen Eisenkörper zur Verringerung des magnetischen Widerstandes verwendet.

Der Stahlmagnet stellt zwischen seinen Schenkeln ein konstantes Feld her, dessen Stärke mit $\mathfrak{H}$ bezeichnet sein möge. Fließt durch die Spule ein Gleichstrom der Stärke i, so tritt auf jeder, einem Magnet-

schenkel zugerichteten Seite der Spule eine Kraftwirkung auf:

$$P = c \cdot \mathfrak{H} \cdot i^*,$$

wobei c eine sich aus Länge und Zahl der Drähte, sowie nach der gewählten Einheit für P ergebende Apparatkonstante bedeutet.

Die Richtung beider auf die Spule wirkenden Kräfte ist derart, daß eine Drehung der Spule zustande kommt, wodurch der Aufhängedraht auf Drehung beansprucht wird (Regel der linken Hand). Die durch die Elastizität des Materiales auftretende Kraft ist proportional zum Verdrehungswinkel α aus dem entspannten Zustande, und die auf

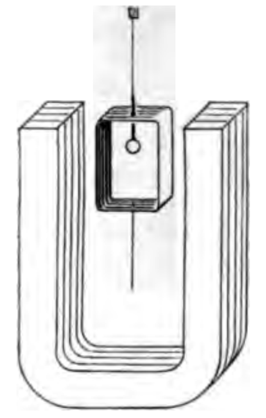


Fig. 351. Galvanometer nach Deprez und d'Arsonval.

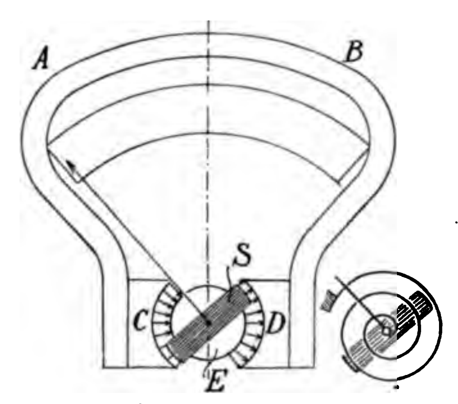


Fig. 352. Schema eines Westoninstrumentes.

den Radius von P gerechnete Gegenkraft P' ist im Zustande des Gleichgewichtes gleich der treibenden Kraft P; es sei

$$P' = c' \cdot \alpha,$$

so lautet die Gleichgewichtsbedingung:

$$c \cdot \mathfrak{H} \cdot i = c' \cdot \alpha$$

oder

$$\alpha = \frac{c}{c'} \cdot \mathfrak{H} \cdot i;$$

$\mathfrak{H}$ selbst ist konstant; der Wert $\frac{c}{c'} \cdot \mathfrak{H}$ heiße C, so wird für ein bestimmtes Instrument:

$$\alpha = C \cdot i;$$

der Verdrehungswinkel ist proportional zur Stromstärke.

Für das in Fig. 351 gezeichnete Instrument gilt dieses Gesetz nur

* Vgl. § 70, C.

für kleine Winkel, solange sich die gegenseitige Lage von Spule und Feld nur wenig ändert.

Das Instrument nach diesem Grundsatz ist von **Weston** zu technischen Strom- und Spannungsmessern vervollständigt worden.

In Fig. 352 bedeutet *ABCD* den Stahlmagneten, der mit den Polschuhen *C* und *D* aus weichem Eisen versehen ist. Die Polschuhe sind ausgebohrt, und zwischen ihnen befindet sich konzentrisch ein Weicheisenzylinder *E*, der seitlich zum Felde (in der Figur etwa unten) gehalten zu denken ist und mit seiner hinteren Stirnseite nicht bis auf die Fundamentplatte herunterreicht.

Die in Edelsteinlagern drehbare Spule *S* durchstreicht auf einen größeren Winkel ein konstantes, radial gerichtetes Feld und wird durch zwei auch zur Zu- und Ableitung des Stromes dienende feine Bronzefedern bei Stromlosigkeit in die Ruhelage gezogen, die Fig. 352 zeigt. Die Federn sind in dieser Stellung der Spule entspannt. Die Achse der Spule ist zweiteilig. Am oberen Teil der Achse ist der Zeiger befestigt. Das ganze drehbare System ist gegen Schwerkraft ausgeglichen.

Da das Feld für den ganzen Zeigerausschlagswinkel konstant bleibt, gilt die oben ausgedrückte Proportionalität für das ganze Meßbereich scharf und man erhält dadurch eine über das ganze Meßbereich gleichmäßige Einteilung der Skala (lineare Skala).

Zur Messung von Gleichstrom in beiden Richtungen, z. B. bei Ladung und Entladung von Akkumulatoren, verwendet man Instrumente, deren Nullstellung in der Mitte der Skala liegt.

Normale Wechselströme erteilen der Spule wechselnde Impulse gleicher Stärke nach beiden Ausschlagsrichtungen, so daß bei den Massenkräften des Zeigersystemes kein Ausschlag zustande kommt.

Bei Spannungsmessern ist vor die Spule *S* ein sehr großer Widerstand *W* geschaltet, so wie es Fig. 353 schematisch zeigt; es sind dann *a* und *b* die Klemmen des Spannungsmessers.



Fig. 353. Fig. 354.

Gute Spannungsmesser dieses Systemes arbeiten bei größtem Zeigerausschlag etwa mit 0,01 Ampere.

Bei Strommessern ist es unmöglich, den gesamten Strom durch die bewegliche Spule zu schicken; es hindert daran der Umstand, daß der Strom durch die Federn zugeleitet werden muß. Man verfährt bei Strommessern nach dem Schema der Fig. 354, indem man einen sehr geringen Widerstand *w* von großem Querschnitt parallel zur Spule schaltet; *a* und *b* in Fig. 354 sind die Klemmen des Strommessers.

Strommesser nach diesem System arbeiten für größten Ausschlag des Zeigers etwa mit 0,1 Ampere in der Drehspule.

Die Dämpfung der Instrumente erfolgt entweder durch Anwendung einer in sich geschlossenen Spulenhülse aus Aluminium, oder es werden besondere Windungen außer den vom Gleichstrom durchflossenen aufgelegt, die dann auf einen einmal eingestellten Widerstand arbeiten; in beiden Fällen sind es Induktionsströme, die unnötige Pendelungen aufhalten. In besonderen Fällen (z. B. bei Strommessern mit Nebenschluß) wirkt die von Gleichstrom durchflossene Wicklung selbst dämpfend, indem sich dem Gleichstrom Induktionsströme überlagern. Am schnellsten stellen sich solche Instrumente ein, bei denen die letzte Spur eines Pendelns eben gerade beseitigt ist.



Fig. 355. Äußeres eines Spannungsmessers nach dem Westonsystem.

Instrumente nach diesem System sind wenig beeinflußbar durch äußere Felder und benachbarte Eisenteile. Für sehr genaue Messungen müssen sie hingegen in bestimmter Weise gegen den Erdmagnetismus gerichtet sein.

Das Wichtigste für die Güte der Instrumente ist die Konstanz der Magnete und der Federn, die für mehrere einheimische Erzeugnisse derjenigen der Original-Westoninstrumente ebenbürtig ist. Fig. 355 zeigt eine für Schalttafeln geeignete Ausführungsform eines Spannungsmessers nach dem hier behandelten System.

§ 101. Elektro-Dynamometer.

Zur Messung von Strömen mit dem Dynamometer benutzt man die Kraft, mit der ein von Strom durchflossener fester Bügel auf einen frei beweglichen und ebenfalls von Strom durchflossenen Bügel wirkt. In Fig. 356 ist die Anordnung der Dynamometer, deren erste Konstruktion von Wilhelm Weber [Hist. 35]) herrührt, schematisch dargestellt. Unter 1 ist der feste, unter 2 der bewegliche Bügel zu verstehen.

Letzterer taucht mit seinen Enden in Quecksilbernäpfe. Er ist an einem Faden aufgehängt. Eine Feder f ist mit dem einen Ende an einem drehbaren Knopf, dem Torsionsknopf T, befestigt, mit dem anderen greift sie an der Achse des drehbaren Bügels an. Geht ein Strom durch das Instrument, so suchen sich die Bügel in eine Ebene zu stellen. Bei der Messung dreht man an dem Torsionsknopf so lange, bis die Drehkraft der Feder den Bügel in seine alte Lage unter 90° zur Ebene des festen Bügels zurückzieht.

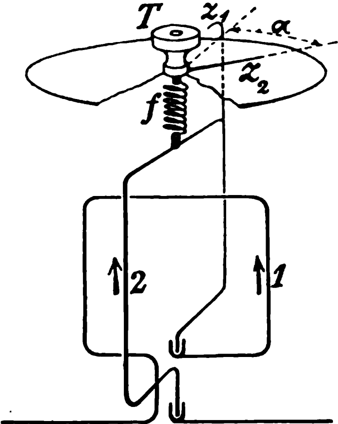


Fig. 356. Schema des Elektro-Dynamometers von Wilhelm Weber.

Die Kraft P, mit der die beiden Bügel jedesmal in derselben gegenseitigen Lage aufeinander wirken, ist proportional zu dem Quadrat der Stromstärke i:

$$P = c \cdot i^2 *;$$

die Verdrehung α der Feder ist proportional zur Kraft P, die daran wirkt:

$$\alpha = c_1 \cdot P;$$

aus diesen beiden Gleichungen zusammen folgt das Ergebnis:

$$i = C\sqrt{\alpha},$$

wobei C die Konstante des Instrumentes bedeutet, welche mittels eines Voltameters oder eines Normalinstrumentes bestimmt werden kann.

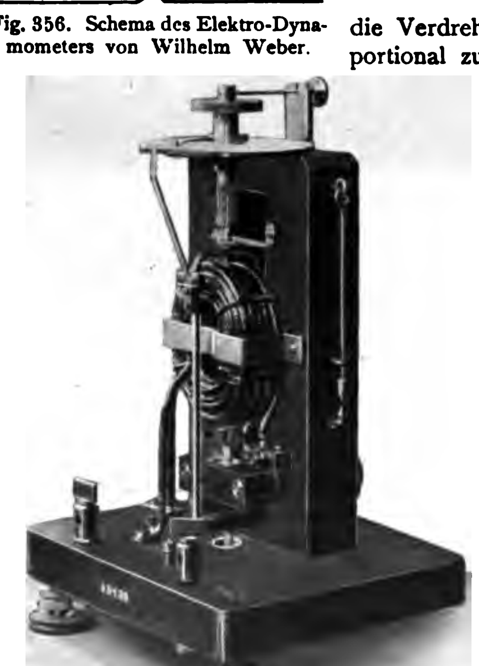


Fig. 357. Äußeres eines Elektro-Dynamometers.

Es ist an dem beweglichen Bügel ein Zeiger z_1 angebracht, welcher über dem Anfang einer Skala oben am Instrument spielt. Am Torsionsknopf fest befindet sich der Zeiger z_2, welcher über die Skala gedreht werden kann. Bei Stromlosigkeit muß der Zeiger z_1

* Vgl. § 70, S. 246.

genau gegenüber dem Torsionszeiger z_2 stehen, wenn letzterer auf den Nullpunkt der Skala gestellt wird. In dieser Lage steht der bewegliche Bügel unter 90° zum festen. Bei Stromdurchgang wird durch Verdrehung des Torsionsknopfes entgegengesetzt zum Ausschlag des Zeigers z_1 der letztere auf den Nullpunkt der Skala zurückgebracht, alsdann steht der bewegliche Bügel wieder unter 90° zum festen, und der Torsionszeiger gibt den Verdrehungswinkel α an.

An Stelle des festen Bügels verwendet man bei der Messung geringer Stromstärken eine feste Spule. Für mehrere Meßbereiche legt man zwei feste Spulen übereinander, die eine mit mehr, die andere mit weniger Windungen; ein Umschalthebel gestattet die Wahl des einen oder des anderen Meßbereiches. Ein Instrument dieser Art in Ausführungsform von Siemens & Halske zeigt Fig. 357. Es ist mit einer quadratischen Skala versehen, d. h. die Strecken der Skala vom Nullpunkt aus sind proportional zum Quadrat der an den betreffenden Stellen stehenden Zahlen. Die Ablesungen sind somit direkt proportional zum Werte $\sqrt{\alpha}$; es gilt dann, wenn n die Ablesung bei einer bestimmten Stromstärke i heißen möge, die Gleichung

$$i = C \cdot n,$$

wobei C die Instrumentenkonstante bedeutet.

Da der Drehsinn beider Spulen aufeinander unabhängig von der Stromrichtung ist, wie aus der Formel

$$P = c \cdot i^2$$

erkannt wird, sind die Instrumente (und zwar auch ein und dasselbe Instrument) für Wechselstrom und Gleichstrom anwendbar. Sie sind in Probiersälen vielfach in Gebrauch, eignen sich aber nicht als Schalttafelinstrumente.

Das Hauptverwendungsbereich liegt im Gebiet des Wechselstromes, da das Instrument bei geeigneter Handhabung gegen Hitzdraht- und Weicheiseninstrumente recht geringe Fehlerquellen aufweist.

§ 102. Leistungsmesser.

Um die Leistung zu messen, die von zwei Klemmen entnommen wird, genügt es bei Gleichstrom, die Zahl der Volt mit der Zahl der Ampere zu multiplizieren, das Produkt gibt die Zahl der Watt; da die technischen Betriebe mit konstanter Netzspannung arbeiten, ist die Leistung proportional zur Stromstärke, und Leistungsmesser sind daher in Gleichstrombetrieben nicht zu finden. Im Gebiet des Wechselstromes gilt, wie spätere Kapitel zeigen, die einfache Bildung des Produktes der Volt und Ampere nicht mehr für alle Fälle zur Bildung der Leistung, und hier sind die Leistungsmesser am Platze. Sie enthalten stets zwei Spulen, von denen die eine den Strom der Anlage führt und wie ein Strommesser geschaltet ist, während die andere von einem sehr schwachen Strom durchflossen wird, den man unter

Vorschaltung eines großen, zweidrähtig gewickelten Widerstandes den Klemmen der Anlage direkt entnimmt; diese Spule ist wie ein Spannungsmesser geschaltet.

A. Der ältere einstellbare Leistungsmesser.

Das Instrument, welches Ähnlichkeit hat mit einem Dynamometer, besitzt eine feststehende Spule aus dickem Draht und eine bewegliche Spule aus vielen dünnen Windungen, die ebenso aufgehängt ist, wie die bewegliche Spule des Dynamometers. Letztere ist die Spannungsspule. Der ihr vorgeschaltete große Widerstand ist in dem Schema des Instrumentes Fig. 358 mit W_1 bezeichnet, während der Widerstand der beweglichen Spule W_2 heißen möge. Die Drähte 1 und 2 kommen von der Elektrizitätsquelle; a und b sind die Klemmen der Anlage, deren Leistungsverbrauch zu messen ist. Als Belastung sind in der Figur eine Anzahl von Glühlampen gedacht. Die Spannung zwischen den Klemmen a und b sei E, die Stromstärke der Anlage I. Letztere durchfließt die dickdrähtige feste Spule des Instrumentes.

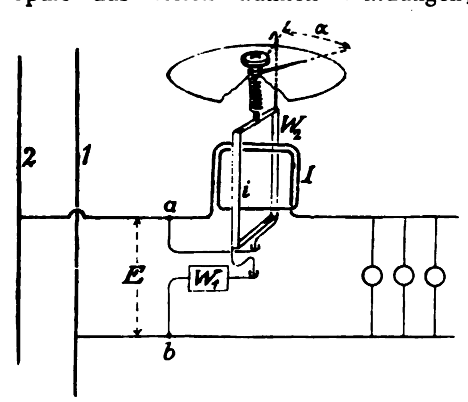


Fig. 358. Schema eines einstellbaren Leistungsmessers.

Die Betrachtung sei hier nur für Gleichstrom durchgeführt. Das Wechselstromgebiet klärt die Vorgänge auch für Wechselstrom.

Der Strom im Spannungskreise stellt sich ein zu:

$$i = \frac{E}{W_1 + W_2}.$$

Die von der Anlage aufgenommene Leistung ist unter Vernachlässigung des Stromes i, der stets gegen I einen sehr geringen Wert hat:

$$L = E \cdot I.$$

Die Drehkraft zwischen beiden Spulen befolgt das Gesetz:

$$P = c \cdot I \cdot i^*,$$

wobei c eine Konstante bedeutet. Daraus folgt nach obigen Gleichungen:

$$P = c \cdot I \cdot \frac{E}{W_1 + W_2};$$

$W_1 + W_2$ ist ebenfalls konstant; wenn die Drehkraft durch Verdrehung

* Vgl. § 70, S. 246.

der Feder um einen Winkel α ausgeglichen wird, so ist jedesmal wie bei dem Dynamometer die Verdrehung proportional zur Kraft

$$P = c_1 \alpha;$$

aus der vorigen Gleichung und dieser zusammen ergibt sich:

$$E \cdot I = \frac{c_1}{c} \cdot \alpha (W_1 + W_2)$$

oder:

$$L = C \cdot \alpha (W_1 + W_2),$$

wobei C die Konstante des Instrumentes ist, welche mit Hilfe von Normalinstrumenten unter Verwendung von Gleichstrom ermittelt werden muß. Die Widerstände W_1 und W_2 werden an den Apparaten angegeben und sind leicht zu prüfen.

Das, was diese Entwicklung lehren soll, ist: Der Torsionswinkel des eingestellten Instrumentes ist bei konstantem Widerstand im Spannungskreise proportional zu der zwischen den Klemmen a und b auftretenden Leistung.

Fig. 359 stellt das Instrument in einer Ausführungsform von Ganz & Comp. dar. Durch geeignete Schaltvorrichtung kann sowohl an den Stromspulen als auch am Vorschalt-Widerstand der Spannungsspule das Meßbereich verändert werden.

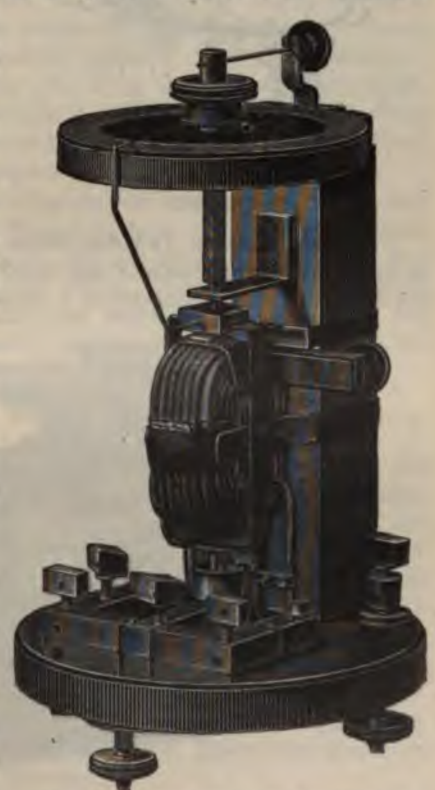


Fig. 359. Äußeres eines einstellbaren Leistungsmessers.

Die Spannungsspule darf an diesem Instrument höchstens einen Strom von 0,1 Ampere bekommen, also müssen bei 100 Volt mindestens 1000 Ohm im Spannungskreise durchflossen werden. Es ist darauf zu achten, daß man von der Klemme a aus (Fig. 358) sowohl zur Strom-, als auch zur Spannungsspule des Instrumentes gelangen kann, ohne daß dabei ein größerer Widerstand durchlaufen werden muß. Im anderen Falle besitzt die feste Spule gegen die bewegliche bedeutende Spannung, was unter besonderen Umständen

zu empfindlichen Kurzschlüssen Veranlassung geben kann. Vorliegendes Instrument kommt für Schalttafeln nicht in Frage.

B. Der direkt zeigende Leistungsmesser von Siemens & Halske.

Der direkt zeigende Leistungsmesser von Siemens & Halske ist ein unmittelbar ablesbares Instrument, d. h. ein Zeiger gibt ohne vorherige Einstellung von Hand die Zahl der Watt an, die eine Anlage liefert oder verbraucht.

Ein (ringförmiger, in 2 parallelgeschalteten Hälften durchströmter) Leiter liefert oberhalb oder unterhalb seiner Ebene ein im wesentlichen radial verlaufendes magnetisches Feld, so wie es durch Fig. 360 angedeutet ist. Dieses Feld erinnert an dasjenige der Westoninstrumente, nur ist es nicht konstant, sondern es wächst proportional zu der durch den Ring fließenden Stromstärke I, unter der der Strom der Anlage verstanden sein möge.

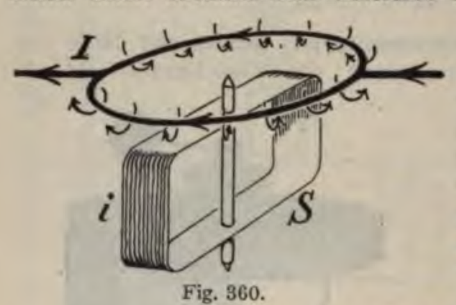


Fig. 360.

In dem radialen Teil des Feldes dreht sich, wie bei den Westoninstrumenten, eine Spule S aus einer großen Anzahl von Windungen, durch die der Spannungsstrom i fließt. Diese Spule wird durch zwei


Fig. 361.

Spiralfedern, welche zugleich zur Stromzuleitung dienen, in eine bestimmte Ruhelage gezogen, wenn kein Strom I oder i auftritt. Nur durch die Wirkung beider Ströme zusammen wirkt auf die Spule eine Drehkraft proportional zu dem Produkt der beiden Stromstärken, also

auch proportional zur Leistung. Dieser magnetischen Kraft tritt durch die sich spannenden Spiralfedern eine zum Verdrehungswinkel proportionale Kraft entgegen. Der Zeiger des Instrumentes ist an der Achse der Drehspule befestigt. Weiterhin gilt alles entsprechend dem vorigen Instrument, so daß für die Leistung

$$L = C \cdot \alpha (W_1 + W_2)$$

tritt, wobei W_1 den Widerstand der Drehspule und W_2 den ihr vorgeschalteten Widerstand, α die abgelesene Anzahl Skalenteile und C eine Konstante bedeutet. Die Werte $C \cdot (W_1 + W_2)$ dieser Instrumente sind runde Zahlen, meistens Vielfache von 10.

Fig. 361 zeigt die Ansicht des Instrumentes bei abgenommenem Gehäuse. Der oben in Klammer erwähnte Ring wird durch mehrere je nach der erforderlichen Stromstärke parallel- oder hintereinandergeschaltete Kupferlamellen gebildet. Der Ring ist zweimal angewendet, oberhalb und unterhalb der Drehspule. Ein gebogenes Rohr dient in Verbindung mit einer darin beweglichen Scheibe als Luftdämpfung. Alle beweglichen Teile sind ausgeglichen.

Die Leistungsmesser neuester Konstruktion besitzen im Aufbau und in der Form der Stromspule im Sinne leichterer Herstellbarkeit gegen obige Angaben einige Veränderungen, die das Meßverfahren nicht betreffen. Die Stromspule besteht aus einem einfachen Rahmen ohne ringförmige Stirnseite. Man benutzt den angenähert radialen Teil des Feldes, der vor den Enden gewöhnlicher Spulen überhaupt vorhanden ist.

§ 103. Die Zähler.

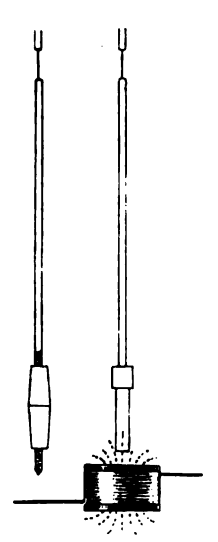
Vorbemerkung.

Hauptsächlich wegen des Verkaufes elektrischer Arbeit durch die Zentralen sind Instrumente erforderlich, die elektrische Arbeit messen. Die Bedürfnisse nach Genauigkeit ihrer Angabe sind im Laufe der Zeit gestiegen. Mit dem Gedanken, daß die Klemmenspannung einer Anlage angenähert konstant gehalten wird, kann die Aufgabe zunächst durch Anwendung von Amperestundenzählern gelöst werden. Diese Instrumente geben die innerhalb einer gewissen Zeit auftretenden Elektrizitätsmengen an. Hierher gehören die der Unbequemlichkeit und des hohen Eigenverbrauches wegen kaum noch in Frage kommenden elektrolytischen Zähler, die bei dem Gebrauch eine Wägung der Ausscheidungsprodukte erfordern, und die ersten Zähler des Systemes Aron, beide nur für Gleichstrom verwendbar.

Mit dem Gedanken, daß das der Zentrale gehörende Leistungssystem Spannungsabfälle bei der Stromentnahme verursacht, daß aber die Leistung am Anschlußpunkt entsprechend dem Geringerwerden der Spannung abnimmt, ist das Bedürfnis nach Wattstundenzählern entstanden, also Instrumenten, die die aufgenommene Arbeit zählen. Die hierfür erforderlichen Instrumente können für Gleichstrom und

für Wechselstrom hergestellt sein; es sind das weiter vervollkommnete Instrumente des Systemes Aron und die Motorzähler.*

Schließlich wurde das Zählerwesen komplizierter durch die Doppeltarife der Elektrizitätswerke. Die von der Zentrale aufzubringende Leistung ist mit der Tageszeit sehr veränderlich. Am höchsten ist die Leistung normalerweise zur Zeit des größten Lichtbedarfes, der durch die Jahreszeit ebenfalls großen Schwankungen unterliegt. Die Anlage der Zentrale muß dem größten Leistungsverbrauch gewachsen sein. In Zeiten geringeren Bedarfes bleibt ein großer Teil der Anlage unbenutzt, während seine Anschaffungskosten verzinst werden müssen, unbekümmert darum, ob der Teil ausgenutzt wird, oder nicht. Die zur Zeit des höchsten Bedarfes Strom verbrauchenden Betriebe tragen also zur Verteuerung der Anlage bei, und so ist es berechtigt, diese Abnehmer für die Zeit des höchsten Bedarfes teurere Sätze auf die Kilowattstunde zahlen zu lassen, als solche, die zu Zeiten geringeren Bedarfes Leistung beanspruchen. Der Gedanke führt zum Doppeltarif, der in vielen Städten eingeführt ist. Der Zähler muß daher ein Werk besitzen, das proportional zur Zeit fortschreitet und zu gewissen einstellbaren Zeiten (auch innerhalb der Monate verschieden) auf billigen, bezw. teueren Betrieb den Zählmechanismus umschaltet. Durch Einführung solcher Tarife hat sich eine für die Zentrale günstigere zeitliche Verteilung der Leistung und bessere Ausnutzung der Anlage ergeben.


Fig. 362. Schema der Pendel älterer Aronzähler.

A. Das System Aron.

Der älteste Zähler dieses Systemes enthält zwei miteinander nicht in Verbindung stehende Laufwerke; das eine hat ein Pendel, auf welches nur die Schwerkraft, das andere hat ein Pendel, auf welches sowohl die Schwerkraft als auch eine magnetische Anziehungskraft einwirkt, wenn Strom durch den Zähler fließt. Das zweite Pendel trägt zu diesem Zweck unter Voraussetzung von Gleichstrom an seinem Ende einen Stahlmagneten, der über einer Spule schwingt, während das erste Pendel etwa aus Messing hergestellt ist. Die beiden Pendel und die Spule sind dargestellt in Fig. 362.

Bei Stromlosigkeit schwingen beide Pendel gleich schnell. Zwischen der Geschwindigkeit der beiden Werke ist kein Unterschied. Bei Stromdurchgang durch die Spule schwingt das von der magnetischen Kraft beeinflußte Pendel

* Eine ausführlichere Beschreibung der nachstehend aufgeführten Zähler findet sich in einer Veröffentlichung der Reichsanstalt: Elektrot. Zeitschr. 1903, S. 361 und S. 383.

schneller, denn das mit konstanter Masse behaftete Pendel ist unter Vernachlässigung des entfernter liegenden Poles einer zusätzlichen Kraft

$$P = c \cdot \mathfrak{m} \cdot I$$

unterworfen, wobei $\mathfrak{m}$ die Polstärke des Magneten, I den Strom in der Spule und c eine Konstante bedeutet. Nach dem Satz: Kraft = Masse mal Beschleunigung wird durch das obige zu der Schwerkraft kommende P die Masse des Pendels proportional zu P beschleunigt, so daß auch die Schwingungszahl in der Zeiteinheit proportional mit dem Strome wachsende Differenzen gegen den ursprünglichen Wert aufweist. Dauert die zusätzliche Schwingungszahl in der Sekunde (n') gewisse Zeit (t Sekunden) an, so hat das beeinflußte Pendel in dieser Zeit

$$n = n' \cdot t = C \cdot I \cdot t$$

Schwingungen mehr gemacht, als das unbeeinflußte, wobei C eine Apparatkonstante bedeutet. Die Handhabung solcher Zähler ist so zu denken, daß sie etwa am Anfang jedes Monats auf gleiche Zeigerstellung gebracht werden. Das stromliefernde Werk stellt etwa am Ende des Monats die durch zwei Zeigerablesungen sich ergebende Differenz fest, zu der proportional die Stromkosten gerechnet werden. Bei den ältesten Zählern gab das unbeeinflußte Werk unmittelbar die Zeit an.

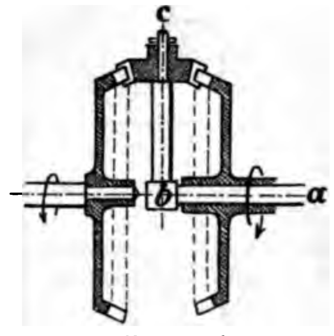


Fig. 363. Planetenrädergetriebe.

Eine Verbesserung bildete die Anwendung des Planetenrädergetriebes, Fig. 363; das Rad links möge mit dem Uhrwerk in Verbindung stehen, das Rad rechts mit dem Werk, auf das auch der Magnetismus einwirkt. Beide Räder drehen sich gegeneinander. Ein drittes, kleineres Rad, welches auf dem Dorn bc drehbar ist, greift gleichzeitig mit seinen Zähnen in die beiden seitlichen Räder ein. Drehen sich die letzteren mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit, so bleibt das dritte, kleine Rad beim Umlauf um seine eigene Achse an e i n e r Stelle. Ist dagegen eine Geschwindigkeitsdifferenz vorhanden, so läuft das kleine Rad um und zwar durch Drehung um sich selbst und um die Achse ab. Mit dieser Achse wird das Zählwerk angetrieben, welches so eingerichtet ist, daß es unmittelbar den Amperestundenverbrauch angibt.

Bei Wattstundenzählern wendet man die Wirkung zweier stromdurchflossener Spulen aufeinander an und bringt das Pendel, welches in Fig. 364 gezeichnet ist, neben das Zeitpendel. Durch die feste Spule fließt der Strom I des Abnehmers, durch die bewegliche Spule, die viele Windungen eines feinen Drahtes enthält, fließt der Spannungsstrom i, der unter Vorschaltung eines großen Widerstandes direkt den Klemmen der Anlage entnommen wird. Die Kraftwirkung P der

beiden Spulen aufeinander ist proportional dem Produkt der beiden Stromstärken, also auch proportional der Leistung

$$P = c \cdot I \cdot i = c_1 \cdot E \cdot I = c_1 \cdot L,$$

wobei c und c_1 Konstanten bedeuten. Die zusätzliche sekundliche Schwingungszahl des beeinflußten Pendels ist daher ebenfalls proportional zu Leistung; die in einer bestimmten Zeit auftretende Differenz der Schwingungszahlen schließlich ist proportional zu der innerhalb dieser Zeit abgegebenen Arbeit.

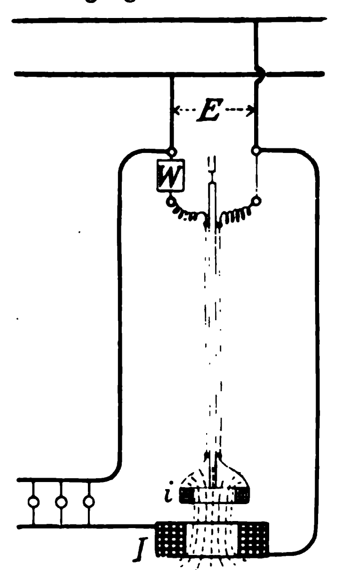


Fig. 364. Schema des beeinflußbaren Pendels für Wattstundenzähler (Aron).

Die Verwendung der dynamischen Wirkung läßt erkennen, daß diese Zähler auch für Wechselstrom in Frage kommen, wozu der Vorschaltwiderstand im Spannungskreise zweidrähtig gewickelt wird. Ältere Zähler dieses Systemes mußten monatlich aufgezogen werden, neuere verwenden elektrische Aufziehvorrichtungen: In nach wenigen Minuten zählenden Zeitabständen schaltet der Zähler eine Spule parallel zum Spannungskreise kurzzeitig ein, wodurch ein Weicheisenteil unter dem Einfluß magnetischer Kraft eine die Werke treibende Feder spannt. Zusammen mit dem elektrischen Aufzug bildet die Anwendung von zwei beeinflußbaren Pendeln unter Fortfall des Zeitpendels eine weitere Verbesserung. Es wird das eine beider Pendel durch die dynamische Kraft beschleunigt, das andere verzögert, und die Art der Beeinflussung beider Pendel vertauscht sich zeitweilig. Die Vertauschung, die zugleich eine mechanische Umschaltung des Zählwerkes voraussetzt, läßt Fehler, die durch ungleiche Pendellängen usw. bei dem alten System entstehen würden, verschwinden.

B. Die Motorzähler.

Bei Motorzählern verwendet man die Kraft, mit der die Stromspule und Spannungsspule aufeinander wirken, zu einer Drehbewegung nach dem Vorbilde der Gleichstrommotoren.

Eine zweiteilige feststehende Spule ist vom Strome I der Anlage durchflossen und erzeugt ein magnetisches Feld proportional zu I, dessen Kraftlinien in der schematischen Darstellung, Fig. 365, wagerecht eingezeichnet sind. In diesem Felde befindet sich ein in Fig. 365 nur durch eine Spule angedeutetes System drehbarer Spulen, das von dem Spannungsstrom i so durchflossen ist, daß die Kraftlinien dieses Systemes allein normal zu dem Felde der festen Spulen ver-

laufen würden. Das Drehmoment, das auf den beweglichen Teil ausgeübt wird, beträgt

$$D = c \cdot I \cdot i,$$

wobei c eine durch Apparat und Maßsystem bestimmte Konstante bedeutet.

Das System der drehbaren Spulen besteht aus einem aus feinen Drähten nach Art eines Trommelankers gewickelten Umlaufskörper, meistens in Form eines Balles (B in Fig. 366). Damit in jeder Stellung seine Windungen relativ zu denjenigen der festen Spulen in gleichem Sinne durchflossen werden, benutzt man, ganz wie bei den Gleichstrommaschinen, einen Kollektor (K in Fig. 366) mit zwei gegenüberstehenden Schleiffedern (F in Fig. 366) entsprechend den Bürsten der Gleichstrommaschinen. Der Widerstand des umlaufenden Teiles heiße W_1 und die mit ihm hintereinandergeschaltete Ohmzahl W_2 (s. Fig. 365). Windungszahl des Ankers, Feld, Widerstand des Spannungskreises und höchste sekundliche Umlaufszahl sind so gewählt, daß die elektromotorische Gegenkraft verschwindend klein ist gegen die zur Überwindung von $W_1 + W_2$ erforderliche Spannung.

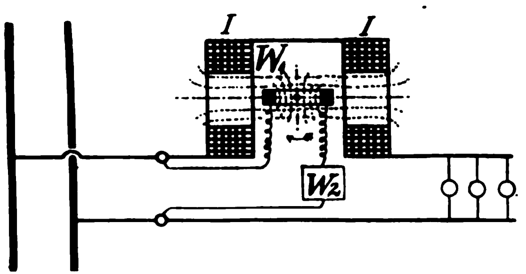


Fig. 365. Schema zum Motorzähler.

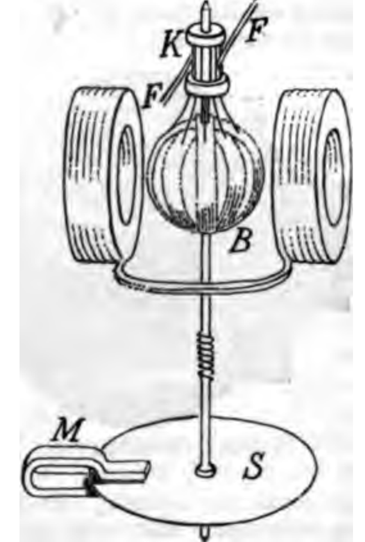


Fig. 366. Skizze zum Motorzähler.

Ist E die Spannung an den Klemmen der Anlage, so wird unter obigen Voraussetzungen für das Drehmoment des Balles der Ausdruck erhalten:

$$D = c \cdot I \cdot \frac{E}{W_1 + W_2},$$

wobei

$$\frac{c}{W_1 + W_2} = k,$$

für einen bestimmten Apparat ebenfalls eine Konstante, geschrieben werden kann. Das Drehmoment ist also, wie bei den Wattmetern, proportional zu Leistung:

$$D = k \cdot E \cdot I = k \cdot L.$$

Sollte es nun möglich sein eine Einrichtung zu finden, die eine sekundliche Umlaufszahl des Balles proportional zu D herstellt, so würde aus der Zahl der Umläufe des Balles in einer bestimmten Zeit die Arbeit beurteilt werden können.

Eine solche Einrichtung gibt es in Form einer Wirbelstrombremse. Auf der Achse des Balles sitzt eine Scheibe aus Metallblech (S in Fig. 366), gewöhnlich aus Kupfer. Sie dreht sich durch einen konstanten, an bestimmten Stellen auftretenden Kraftfluß, der gewöhnlich von einem oder zwei Stahlmagneten M herrührt. Bei Drehung der Scheibe mit n Umläufen in der Sekunde tritt daher eine Induktionsspannung

$$e' = c' \cdot n$$

auf, die in der Scheibe einen Wirbelstrom

$$i' = c'' \cdot n$$

hervorruft, vorausgesetzt, daß für alle Ströme i' der Widerstand der Wirbelstromscheibe den gleichen Wert aufweist. Zwischen diesem Wirbelstrom und dem konstanten Feld $\mathfrak{H}$ des Stahlmagneten tritt eine Kraft auf

$$P' = c''' \cdot \mathfrak{H} \cdot i' = c''' \cdot \mathfrak{H} \cdot c'' \cdot n = c_1 \cdot n,$$

wobei die Konstante $c''' \cdot \mathfrak{H} \cdot c''$ durch c_1 ausgedrückt ist. Diese Kraft, die als Gegenkraft zu der treibenden des Balles auftritt, ist also proportional zur sekundlichen Umdrehungszahl. Das gleiche läßt sich mit einer anderen Konstanten k' von dem Gegendrehmoment sagen:



Fig. 367. Hummelzähler.

$$D' = k' \cdot n;$$

D und D' sind im Beharrungszustand einander gleich, daraus folgt:

$$k \cdot L = k' \cdot n$$

oder

$$n = \frac{k}{k'} \cdot L = C \cdot L,$$

oder in Worten: die sekundliche Umgangszahl des Balles ist proportional zur Leistung. Es folgt daraus, daß die Zahl der Umgänge in bestimmter Zeit proportional zu der in dieser Zeit auftretenden Arbeit ist. Das Meßverfahren ist auch für Wechselstrom anwendbar.

Es ist schließlich von der Achse des drehbaren Teiles aus eine geeignete Übersetzung auf ein Zählwerk herzustellen, welches unmittelbar die Arbeit (gewöhnlich in Kilowattstunden) angibt. Das geschieht meistens unter Anwendung einer Schnecke.

Zähler dieser Art heißen entweder nach ihrem Urheber Thomsonzähler, oder nach der an einen Gleichstrommotor erinnernden Anordnung Motorzähler. Man baut sie mit und ohne Eisen im magnetischen Kreise. Fig. 367 stellt eine Ausführungsform ohne Eisen nach Hummel dar. Erkennbar ist daran außer dem bisher Behandelten eine Kompensationsspule, die im Spannungskreise liegend innerhalb einer Hauptstromspule eingestellt ist. Sie dient zur Verringerung der durch die Lagerreibung der Spindel entstehenden Fehler.

12. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

§ 104. Vorbemerkungen.

A. Polarisation als störende Erscheinung und ein Beispiel eines konstanten Primärelementes.

Der Stromdurchgang durch einen beliebigen Elektrolyten ruft eine Zersetzung des Elektrolyten hervor und erzeugt zwischen den Elektroden eine Spannung, die dem Strome entgegenwirkt, und die als Polarisationsspannung bezeichnet wird. Diese Polarisationsspannung tritt auf infolge des Vorhandenseins verschiedener Materien an beiden Elektroden, wie an einem primären Element. Taucht man z. B. eine Kupferplatte und eine Zinkplatte in verdünnte Schwefelsäure, und verbindet man beide Platten, so erhält man zunächst, da das Kupfer elektropositiv, das Zink elektronegativ ist, einen Strom im Außenkreise vom Kupfer zum Zink. Dieser Strom fließt im Element vom Zink zum Kupfer, scheidet am Kupfer Wasserstoff und am Zink SO_4-Moleküle aus, die sich mit Zink zu $ZnSO_4$ vereinigen. Der Wasserstoff ist elektronegativ, die SO_4-Moleküle sind elektropositiv, also sucht der Strom durch seine Wirkung im Element die Ursache seiner Entstehung aufzuheben. Die Wirkungen erzeugen gegen die EMK von Kupfer zu Zink eine EMGK von $2H$ zu SO_4. Man erkennt diese Wirkung daran, daß der Strom dieses Elementes nach einiger Zeit des Stromdurchganges immer mehr abnimmt.

Die Polarisationserscheinung ist bei primären Elementen störend, und deshalb bedürfen die Elemente für konstante Stromlieferung besonderer Zusammensetzung, derart, daß die Ausscheidungsprodukte in geeigneter Weise weitere chemische Verbindungen eingehen, von denen eine mit der Bildung von $ZnSO_4$ oben schon genannt wurde. Setzt man das Kupfer in Kupfervitriollösung und trennt man diese von der

verdünnten Schwefelsäure, in der das Zink steht, durch eine poröse Scheidewand (vgl. Fig. 368), so entsteht das Daniell[Hist. 24])-element:*

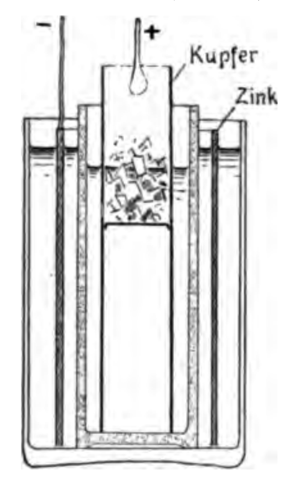


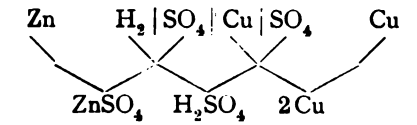
Fig. 368. Daniellelement.

$$Zn \; H_2SO_4 \,|\, CuSO_4 \; Cu.$$

Der obere Pfeil gibt die Richtung des Stromes im Außenkreise an, der untere die Richtung des Stromes im Element.

Der Strom scheidet H_2SO_4 in H_2 und SO_4, sowie $CuSO_4$ in Cu und SO_4; Wasserstoff und Kupfer wandern in Richtung des Stromes (zur Kathode), die beiden SO_4 gegen den Strom (zur Anode).

Das ausgeschiedene Kupfer setzt sich an die Kupferplatte an, das SO_4 der Schwefelsäure verbindet sich mit dem Zink zu $ZnSO_4$; das SO_4 des Kupfervitriols trifft sich an der porösen Scheidewand mit dem Wasserstoff der Schwefelsäure und bildet dort neue Schwefelsäure; so wird der Vorgang in vereinfachter Schreibweise (ohne Wasser) ausgedrückt durch die Formel:



Das ausgeschiedene Zinkvitriol hält sich in dem Wasser der verdünnten Schwefelsäure auf. Die Anzahl Schwefelsäuremoleküle bleibt stets gleich.

Der elektrischen Arbeit, die bei einem Element auftritt, entspricht die chemische Arbeit beim Umsatze seiner Bestandteile, so daß der Vorgang in Hinsicht auf diesen Punkt an eine Verbrennung erinnert.

Die wichtigsten Forschungen über die Beziehungen zwischen dem Arbeitsumsatz bei chemischen Vorgängen und dem Auftreten elektrischer Arbeit bei elektrolytischer Zersetzung rühren von Helmholtz[Hist. 41]) her. Darnach kann gesagt werden:

1. Für diejenigen Elemente, die mit der Temperatur ihre EMK nicht ändern, kann aus der Wärmetönung U des chemischen Vor-

* Die Kupfervitriollösung muß durch Hineinlegen einiger Kupfervitriolstücke stets gesättigt gehalten werden. Das Zink ist zu amalgamieren.

ganges, bezogen auf 1 g-Äquivalent, die EMK berechnet werden zu:

$$E = c \cdot U;$$

wird E in Volt und U in kg-Kalorien ausgedrückt, so ist $c = 1:23{,}073$.

2. Ändert ein Element mit der Temperatur seine EMK, so kommt ein Korrektionsglied dazu:

$$e = k \cdot T,$$

wofür die Bezeichnungen gelten:

e = zusätzliche Spannung in Volt,
k = Temperaturkoeffizient des Elementes,
T = absolute Temperatur des Elementes.

Es gilt dann für die EMK bei der Temperatur T:

$$E_T = E + e = c \cdot U + kT.$$

Elemente, deren Temperaturkoeffizient positiv ist, kühlen sich bei der Stromabgabe ab, Elemente mit negativem Temperaturkoeffizient erwärmen sich bei der Stromabgabe.

Die unter 1. angeführte Bedingung ist beim Daniellelement erfüllt. Da die Schwefelsäure stets in gleicher Menge erhalten bleibt, kommen für den Umsatz die Wärmetönungen (vgl. Zeile 10 und 11 der Tabelle von § 4 Seite 9) in Frage:

$$Zn + SO_4 = ZnSO_4 \quad + 106{,}1 \text{ Kal. (unter Wasser)}$$
$$CuSO_4 = Cu + SO_4 - \quad 56 \quad \text{„ („ „).}$$

Der Wärmeumsatz im Element bezogen auf 63,3 g Cu beträgt 106,1 — 56 = 50,1 Kal. Da Kupfer zweiwertig ist, ist die Wärmemenge auf 1 g-Äquivalent (also auf 31,65 g Cu) die Hälfte hiervon:

$$U = 25{,}05 \text{ Kal.};$$

daraus folgt die Spannung des Daniellelementes:

$$E = \frac{1}{23{,}073} \cdot U = \frac{25{,}05}{23{,}073} = 1{,}086 \text{ Volt.}$$

Für die Stromentnahme des Elementes gelten die bereits in § 17, II (Beispiel) und § 23 angeführten Sätze betreffend die Proportionalität zwischen Ausscheidungsprodukten und Strom und Zeit, sowie die Festlegung des Ampere aus dem Silber- bezw. Kupfergewicht. Damit gilt für ein Daniellelement, das mit 1 Ampere betrieben wird (entsprechend 19,76 mg Kupfer in der Minute) eine Kupferausscheidung von 1,1856 g stündlich. Dabei setzt das Element 1,086 Volt × 1 Amp. × 1 Stunde = 1,086 Wattstunden von chemischer Energie in elektrische um. Es werden dazu verbraucht an Kupfervitriol ($CuSO_4 + 5H_2O$) 4,65 g und an Zink 1,225 g. Diesen Rechnungen liegen die Molekulargewichte für Kupfer 63,6, für Schwefel 32,06, für Sauerstoff 15,96, für Wasser 17,98

und für Zink 65,4 zugrunde. Die Schwefelsäure bleibt, wie oben angegeben, erhalten und ist daher nicht zu berücksichtigen. Praktisch liegt der Verbrauch vor allem für das Zink höher, als dem hier gerechneten Umsatz entspricht. Werden die Kosten des Kupfervitrioles mit $k_{CuSO_4} = 0{,}1$ ₰ für das g und des Zinkes mit $k_{Zn} = 0{,}08$ ₰ für das g angenommen, so betragen demnach die Kosten k für die umgesetzte Wattstunde ohne Rücksicht auf Verluste im Element nur für die Verbrauchsmaterialien unter der Annahme, daß die Erzeugnisse des Elementes nicht weiter verwendet werden:

$$k = \frac{1}{1{,}086}(4{,}65 \cdot k_{CuSO_4} + 1{,}225 \cdot k_{Zn})$$

$$= \frac{1}{1{,}086}(4{,}65 \cdot 0{,}1 + 1{,}225 \cdot 0{,}08)$$

$$= 0{,}519 \text{ ₰},$$

oder für die innere Kilowattstunde 5,19 ℳ. Praktisch kann etwa das Zehnfache dieses Wertes für die nutzbare Kilowattstunde gerechnet werden, während sie einer Zentrale in Selbstkosten etwa 5 bis 8 ₰ zu stehen kommt.

Diese Rechnung zeigt an einem Beispiel, was auch für andere Fälle gilt, daß bisher bekannte primäre Elemente als Energiequellen für größere Arbeitsabgabe nicht in Frage kommen können.

B. Nutzbarmachung der Polarisation im Beispiel von Wasserstoff und Sauerstoff.

Die Möglichkeit der Ausnutzung der Polarisationserscheinung ergibt sich durch folgenden einfachen Versuch:

In Fig. 369 bedeutet A eine Gleichstromquelle und B ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Gefäß, in das zwei Kohlenplatten

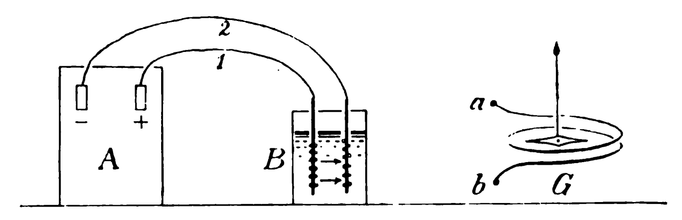


Fig. 369.

oder zwei Platinbleche tauchen. Die Einrichtung bei B ist zunächst kein Element, wie sich durch Verbindung der Elektroden mit den Klemmen eines Meßgerätes G zeigen läßt. Wird dagegen zuerst ein Strom von A aus durch B geschickt, indem nach Fig. 369 beispielsweise die linke Elektrode an den Pluspol, die rechte an den Minuspol von A gelegt wird, so treten an der Kathode (rechts) Wasserstoff-,

an der Anode (links) Sauerstoffionen auf, und es entsteht die Polarisationsspannung, gegen die die EMK der Stromquelle zu arbeiten hat. Ist *A* ein Akkumulator, so kann durch Einschaltung von *G* in den Kreis der Fig. 369 gezeigt werden, daß der Strom im ersten Augenblick nach dem Einschalten groß ist, während weiterhin die Stromstärke allmählich abnimmt. Durch diese Erscheinung wird das Auftreten der EMGK bewiesen. Die Polarisationsspannung bleibt auch nach der Unterbrechung des in Fig. 369 gezeichneten Kreises bestehen, solange sich Wasserstoff und Sauerstoff getrennt an den Elektroden aufhalten. Das geht aus einem Versuch nach Fig. 370 hervor, für den die Elektroden von *B* kurz nach einem Ladevorgang durch *G* geschlossen werden. Der Zeiger des Meßgerätes erhält einen Ausschlag, der einen Strom im Sinne der nunmehr in *B* eingezeichneten Pfeile andeutet.

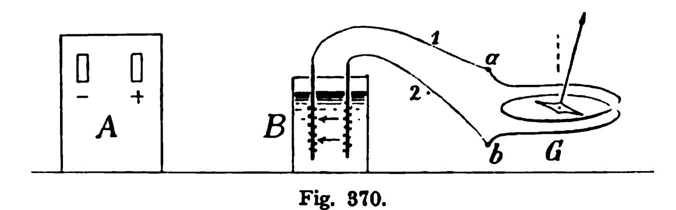


Fig. 370.

Diejenige Elektrode, an der in der vorigen Schaltung, beim Ladungsvorgang, der Pluspol gelegen hatte, ist zum Pluspol geworden; die Stromrichtung im Element, das vorher Stromverbraucher war und nun Stromquelle geworden ist, ist beim zweiten Vorgang, der Entladung, umgekehrt gegen die Richtung des Ladestromes. An der mit Sauerstoff behafteten Elektrode befindet sich der positive, an der mit Wasserstoff behafteten der negative Pol. Die elektrolytische Stromwirkung beim Entladevorgang schickt Wasserstoffionen gegen den Sauerstoff und Sauerstoffionen gegen den Wasserstoff, so daß die bei der Ladung ausgeschiedenen Produkte beim Entladen zu Wasser zurückgebildet werden. Mit Erschöpfung der Ausscheidungsprodukte ist die Wirkung beendet.

Bei der Ladung bildet die Summe der Produkte aus EMGK, Stromstärke und der zu diesen Werten gehörigen Zeitteile die in der Zelle von elektrischer Form in chemische Form umgesetzte Arbeit. Ladungs- und Entladungsvorgänge sind nicht frei von Verlusten.

Unter der Voraussetzung, daß das Wasserstoff-Sauerstoffelement keinen Temperaturkoeffizienten besitze, läßt sich seine Spannung ausrechnen (vgl. Zeile 2 der Tabelle von § 4 Seite 9) aus der für die Verbindung unter Wasser gültigen Formel für den Umsatz:

$$2\,H + O = H_2O + 78 \text{ Kal.}$$

Da zwei Teile Wasserstoff bei dem Umsatz auftreten und der Wasser-

stoff einwertig ist, beträgt die Wärmetönung des Vorganges bezogen auf 1 g-Äquivalent (also auf 1 g H) die Hälfte hiervon:

$$U = 39 \text{ Kal.};$$

daraus würde unter obiger Voraussetzung für die Spannung des Wasserstoff-Sauerstoffelementes folgen:

$$E = \frac{1}{23{,}073} \cdot U = \frac{39}{23{,}073} = 1{,}69 \text{ Volt.}$$

Entsprechend einer Silberausscheidung durch 1 Ampere $p_{Ag} =$ 67,08 mg/Min., einem Atomgewicht des Silbers $\gamma_{Ag} = 107{,}93$, des Wasserstoffes $\gamma_H = 1{,}01$ und des Sauerstoffes $\gamma_O = 15{,}96$ berechnet sich für 1 Ampere

a) die minutliche Wasserstoffmenge zu:

$$p_H = p_{Ag} \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1{,}01}{107{,}93} = 0{,}628 \text{ mg/Min.},$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v_H = 0{,}000628 \cdot 11164 = 7{,}01 \text{ ccm/Min.};$$

b) die minutliche Sauerstoffmenge zu:

$$p_O = p_{Ag} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_O}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{15{,}96}{107{,}93} = 4{,}96 \text{ mg/Min.},$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v_O = 0{,}00496 \cdot 699{,}4 = 3{,}47 \text{ ccm/Min.};$$

c) die Summe von Wasserstoff und Sauerstoff zu:

$$p = 0{,}628 + 4{,}96 = 5{,}588 \text{ mg/Min.}$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v = 7{,}01 + 3{,}47 = 10{,}48 \text{ ccm/Min.};$$

1 Amperestunde würde daher bereits ein Gasvolumen von $60 \cdot 10{,}48 =$ 628,8 ccm oder 0,6288 l bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius beanspruchen. An den großen, im freien gasförmigen Zustande nicht unterzubringenden Mengen der Ausscheidungsprodukte scheitert die technische Verwendung der freien Gase zum Zwecke sekundärer Elemente.

§ 105. Der Bleiakkumulator.

A. Grundlehre und Aufbau der einzelnen Zelle.

Außer dem Bleiakkumulator gibt es auch andere Möglichkeiten der elektrolytischen Aufspeicherung von Arbeit. Andere Akkumulatoren haben sich jedoch bisher nicht als überlegen gezeigt.

Verwendet man für einen, demjenigen von § 104 B entsprechenden Versuch Bleielektroden in verdünnter Schwefelsäure, so zeigt sich ebenfalls nach einem vorherigen Stromdurchgang die Möglichkeit einer sekundären Stromabgabe auf Grund elektrolytischer Vorgänge. Die Platte, an der bei der Ladung der positive Pol liegt, färbt sich durch Bleisuperoxyd (PbO_2) braun und bildet den positiven Pol bei der Entladung. Die negative Platte färbt sich mattgrau durch Bildung von Bleischwamm, der als metallisches Blei in aufgelöster Form anzusehen ist.

Die Platten können zwischen der Ladung und Entladung kurzzeitig aus der Säure herausgenommen und abgespült werden, ohne daß die Wirkung beeinträchtigt wird. Dadurch ist erwiesen, daß nicht freie Gasmengen, sondern die Umformungen des Bleies die Erscheinung herbeiführen. Dieser einfachste Akkumulator ist noch unvorteilhaft, denn es entweicht viel Wasserstoff und Sauerstoff bei der Ladung. Die wirksamen Schichten des Superoxydes und Bleischwammes sind zunächst dünn, und die entnehmbare Elektrizitätsmenge ist gering.

Nach dem Verfahren von Planté[Hist. 47]) werden Platten aus massivem Blei, deren Oberflächen durch geeignete Bearbeitung vergrößert sind, in Schwefelsäure einem oftmaligen Ladungs- und Entladungsvorgang unterworfen. Dadurch nehmen die wirksamen Schichten an Dicke zu, die aufnehmbaren und abnehmbaren Elektrizitätsmengen werden größer, und der Akkumulator wird schließlich technisch brauchbar. Die Gasentwicklung tritt nur gegen das Ende der Ladung auf, während bis dahin die Ausscheidungsprodukte durch chemische Umwandlung nutzbar in der Zelle aufgespeichert werden. Der Vorgang der Entwicklung der wirksamen Masse heißt die Formation, die bei dem ursprünglichen Plantéschen Verfahren lange dauerte.* Der Preis der Akkumulatoren fiel dadurch recht hoch aus.

Das Verfahren von Faure[Hist. 52]) beruht darauf, daß poröse, staubförmige Verbindungen von Blei und Sauerstoff (Bleiglätte PbO, Mennige Pb_3O_4), mit Schwefelsäure und Glyzerin, sowie anderen Zusätzen sirupöser Art zu einer Paste angemengt und auf ein Bleigerüst aufgetragen, sich schneller formieren, als das massive Blei, so daß nach einigen Ladungs- und Entladungsvorgängen die Formation der Platten beendet ist. Der natürliche Zusammenhalt dieser Masse ist geringer als bei derjenigen, die aus massivem Blei gebildet wird. Für das Festhalten der aufgetragenen Masse muß durch die Form des Trägergerüstes gesorgt sein, um so mehr, da die Masse bei den chemischen Veränderungen, die sie im Akkumulator erleidet, ihr Volumen ändert. Ein Beispiel eines Trägergerüstes gibt das Gitter von G. Hagen, das in Fig. 371 im Querschnitt, in Fig. 372 zum Teil in Ansicht, zum Teil im Längsschnitt wiedergegeben ist.

Sobald in der Mitte der Platte eine undurchlöcherte Bleischicht liegt, von der aus durch Vorsprünge (Rippen usw.) die Masse getragen

* Vgl. w. u. gegenwärtige Verfahren.

stoff einwertig ist, beträgt die Wärmetönung des Vorganges bezogen auf 1 g-Äquivalent (also auf 1 g H) die Hälfte hiervon:

$$U = 39 \text{ Kal.};$$

daraus würde unter obiger Voraussetzung für die Spannung des Wasserstoff-Sauerstoffelementes folgen:

$$E = \frac{1}{23{,}073} \cdot U = \frac{39}{23{,}073} = 1{,}69 \text{ Volt.}$$

Entsprechend einer Silberausscheidung durch 1 Ampere $p_{Ag} = 67{,}08$ mg/Min., einem Atomgewicht des Silbers $\gamma_{Ag} = 107{,}93$, des Wasserstoffes $\gamma_H = 1{,}01$ und des Sauerstoffes $\gamma_O = 15{,}96$ berechnet sich für 1 Ampere

a) die minutliche Wasserstoffmenge zu:

$$p_H = p_{Ag} \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1{,}01}{107{,}93} = 0{,}628 \text{ mg/Min.},$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v_H = 0{,}000628 \cdot 11164 = 7{,}01 \text{ ccm/Min.};$$

b) die minutliche Sauerstoffmenge zu:

$$p_O = p_{Ag} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_O}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{15{,}96}{107{,}93} = 4{,}96 \text{ mg/Min.},$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v_O = 0{,}00496 \cdot 699{,}4 = 3{,}47 \text{ ccm/Min.};$$

c) die Summe von Wasserstoff und Sauerstoff zu:

$$p = 0{,}628 + 4{,}96 = 5{,}588 \text{ mg/Min.}$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v = 7{,}01 + 3{,}47 = 10{,}48 \text{ ccm/Min.};$$

1 Amperestunde würde daher bereits ein Gasvolumen von $60 \cdot 10{,}48 = 628{,}8$ ccm oder 0,6288 l bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius beanspruchen. An den großen, im freien gasförmigen Zustande nicht unterzubringenden Mengen der Ausscheidungsprodukte scheitert die technische Verwendung der freien Gase zum Zwecke sekundärer Elemente.

§ 105. Der Bleiakkumulator.

A. Grundlehre und Aufbau der einzelnen Zelle.

Außer dem Bleiakkumulator gibt es auch andere Möglichkeiten der elektrolytischen Aufspeicherung von Arbeit. Andere Akkumulatoren haben sich jedoch bisher nicht als überlegen gezeigt.

Verwendet man für einen, demjenigen von § 104 B entsprechenden Versuch Bleielektroden in verdünnter Schwefelsäure, so zeigt sich ebenfalls nach einem vorherigen Stromdurchgang die Möglichkeit einer sekundären Stromabgabe auf Grund elektrolytischer Vorgänge. Die Platte, an der bei der Ladung der positive Pol liegt, färbt sich durch Bleisuperoxyd (PbO_2) braun und bildet den positiven Pol bei der Entladung. Die negative Platte färbt sich mattgrau durch Bildung von Bleischwamm, der als metallisches Blei in aufgelöster Form anzusehen ist.

Die Platten können zwischen der Ladung und Entladung kurzzeitig aus der Säure herausgenommen und abgespült werden, ohne daß die Wirkung beeinträchtigt wird. Dadurch ist erwiesen, daß nicht freie Gasmengen, sondern die Umformungen des Bleies die Erscheinung herbeiführen. Dieser einfachste Akkumulator ist noch unvorteilhaft, denn es entweicht viel Wasserstoff und Sauerstoff bei der Ladung. Die wirksamen Schichten des Superoxydes und Bleischwammes sind zunächst dünn, und die entnehmbare Elektrizitätsmenge ist gering.

Nach dem Verfahren von Planté[Hist. 47]) werden Platten aus massivem Blei, deren Oberflächen durch geeignete Bearbeitung vergrößert sind, in Schwefelsäure einem oftmaligen Ladungs- und Entladungsvorgang unterworfen. Dadurch nehmen die wirksamen Schichten an Dicke zu, die aufnehmbaren und abnehmbaren Elektrizitätsmengen werden größer, und der Akkumulator wird schließlich technisch brauchbar. Die Gasentwicklung tritt nur gegen das Ende der Ladung auf, während bis dahin die Ausscheidungsprodukte durch chemische Umwandlung nutzbar in der Zelle aufgespeichert werden. Der Vorgang der Entwicklung der wirksamen Masse heißt die Formation, die bei dem ursprünglichen Plantéschen Verfahren lange dauerte.* Der Preis der Akkumulatoren fiel dadurch recht hoch aus.

Das Verfahren von Faure[Hist. 52]) beruht darauf, daß poröse, staubförmige Verbindungen von Blei und Sauerstoff (Bleiglätte PbO, Mennige Pb_3O_4), mit Schwefelsäure und Glyzerin, sowie anderen Zusätzen sirupöser Art zu einer Paste angemengt und auf ein Bleigerüst aufgetragen, sich schneller formieren, als das massive Blei, so daß nach einigen Ladungs- und Entladungsvorgängen die Formation der Platten beendet ist. Der natürliche Zusammenhalt dieser Masse ist geringer als bei derjenigen, die aus massivem Blei gebildet wird. Für das Festhalten der aufgetragenen Masse muß durch die Form des Trägergerüstes gesorgt sein, um so mehr, da die Masse bei den chemischen Veränderungen, die sie im Akkumulator erleidet, ihr Volumen ändert. Ein Beispiel eines Trägergerüstes gibt das Gitter von G. Hagen, das in Fig. 371 im Querschnitt, in Fig. 372 zum Teil in Ansicht, zum Teil im Längsschnitt wiedergegeben ist.

Sobald in der Mitte der Platte eine undurchlöcherte Bleischicht liegt, von der aus durch Vorsprünge (Rippen usw.) die Masse getragen

* Vgl. w. u. gegenwärtige Verfahren.

stoff einwertig ist, beträgt die Wärmetönung des Vorganges bezogen auf 1 g-Äquivalent (also auf 1 g H) die Hälfte hiervon:

$$U = 89 \text{ Kal.};$$

daraus würde unter obiger Voraussetzung für die Spannung des Wasserstoff-Sauerstoffelementes folgen:

$$E = \frac{1}{23{,}073} \cdot U = \frac{89}{23{,}073} = 1{,}69 \text{ Volt.}$$

Entsprechend einer Silberausscheidung durch 1 Ampere $p_{Ag} =$ 67,08 mg/Min., einem Atomgewicht des Silbers $\gamma_{Ag} = 107{,}98$, des Wasserstoffes $\gamma_H = 1{,}01$ und des Sauerstoffes $\gamma_O = 15{,}96$ berechnet sich für 1 Ampere

a) die minutliche Wasserstoffmenge zu:

$$p_H = p_{Ag} \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1{,}01}{107{,}93} = 0{,}628 \text{ mg/Min.},$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v_H = 0{,}000628 \cdot 11164 = 7{,}01 \text{ ccm/Min.};$$

b) die minutliche Sauerstoffmenge zu:

$$p_O = p_{Ag} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_O}{\gamma_{Ag}} = 67{,}08 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{15{,}96}{107{,}93} = 4{,}96 \text{ mg/Min.},$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v_O = 0{,}00496 \cdot 699{,}4 = 3{,}47 \text{ ccm/Min.};$$

c) die Summe von Wasserstoff und Sauerstoff zu:

$$p = 0{,}628 + 4{,}96 = 5{,}588 \text{ mg/Min.}$$

oder bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius

$$v = 7{,}01 + 3{,}47 = 10{,}48 \text{ ccm/Min.};$$

1 Amperestunde würde daher bereits ein Gasvolumen von $60 \cdot 10{,}48 =$ 628,8 ccm oder 0,6288 l bei Atmosphärendruck und Null Grad Celsius beanspruchen. An den großen, im freien gasförmigen Zustande nicht unterzubringenden Mengen der Ausscheidungsprodukte scheitert die technische Verwendung der freien Gase zum Zwecke sekundärer Elemente.

§ 105. Der Bleiakkumulator.

A. Grundlehre und Aufbau der einzelnen Zelle.

Außer dem Bleiakkumulator gibt es auch andere Möglichkeiten der elektrolytischen Aufspeicherung von Arbeit. Andere Akkumulatoren haben sich jedoch bisher nicht als überlegen gezeigt.

Verwendet man für einen, demjenigen von § 104 B entsprechenden Versuch Bleielektroden in verdünnter Schwefelsäure, so zeigt sich ebenfalls nach einem vorherigen Stromdurchgang die Möglichkeit einer sekundären Stromabgabe auf Grund elektrolytischer Vorgänge. Die Platte, an der bei der Ladung der positive Pol liegt, färbt sich durch Bleisuperoxyd (PbO_2) braun und bildet den positiven Pol bei der Entladung. Die negative Platte färbt sich mattgrau durch Bildung von Bleischwamm, der als metallisches Blei in aufgelöster Form anzusehen ist.

Die Platten können zwischen der Ladung und Entladung kurzzeitig aus der Säure herausgenommen und abgespült werden, ohne daß die Wirkung beeinträchtigt wird. Dadurch ist erwiesen, daß nicht freie Gasmengen, sondern die Umformungen des Bleies die Erscheinung herbeiführen. Dieser einfachste Akkumulator ist noch unvorteilhaft, denn es entweicht viel Wasserstoff und Sauerstoff bei der Ladung. Die wirksamen Schichten des Superoxydes und Bleischwammes sind zunächst dünn, und die entnehmbare Elektrizitätsmenge ist gering.

Nach dem Verfahren von Planté[Hist. 47]) werden Platten aus massivem Blei, deren Oberflächen durch geeignete Bearbeitung vergrößert sind, in Schwefelsäure einem oftmaligen Ladungs- und Entladungsvorgang unterworfen. Dadurch nehmen die wirksamen Schichten an Dicke zu, die aufnehmbaren und abnehmbaren Elektrizitätsmengen werden größer, und der Akkumulator wird schließlich technisch brauchbar. Die Gasentwicklung tritt nur gegen das Ende der Ladung auf, während bis dahin die Ausscheidungsprodukte durch chemische Umwandlung nutzbar in der Zelle aufgespeichert werden. Der Vorgang der Entwicklung der wirksamen Masse heißt die Formation, die bei dem ursprünglichen Plantéschen Verfahren lange dauerte.* Der Preis der Akkumulatoren fiel dadurch recht hoch aus.

Das Verfahren von Faure[Hist. 52]) beruht darauf, daß poröse, staubförmige Verbindungen von Blei und Sauerstoff (Bleiglätte PbO, Mennige Pb_3O_4), mit Schwefelsäure und Glyzerin, sowie anderen Zusätzen sirupöser Art zu einer Paste angemengt und auf ein Bleigerüst aufgetragen, sich schneller formieren, als das massive Blei, so daß nach einigen Ladungs- und Entladungsvorgängen die Formation der Platten beendet ist. Der natürliche Zusammenhalt dieser Masse ist geringer als bei derjenigen, die aus massivem Blei gebildet wird. Für das Festhalten der aufgetragenen Masse muß durch die Form des Trägergerüstes gesorgt sein, um so mehr, da die Masse bei den chemischen Veränderungen, die sie im Akkumulator erleidet, ihr Volumen ändert. Ein Beispiel eines Trägergerüstes gibt das Gitter von G. Hagen, das in Fig. 371 im Querschnitt, in Fig. 372 zum Teil in Ansicht, zum Teil im Längsschnitt wiedergegeben ist.

Sobald in der Mitte der Platte eine undurchlöcherte Bleischicht liegt, von der aus durch Vorsprünge (Rippen usw.) die Masse getragen

* Vgl. w. u. gegenwärtige Verfahren.

wird, so heißen die Platten Seelenplatten. Die mit durchgehenden Öffnungen versehenen Gitterplatten werden entweder im ganzen gegossen oder in Teilen hergestellt und durch Bleinieten zusammengehalten; ihre Hohlräume sind mit aufgetragener Masse ausgefüllt.

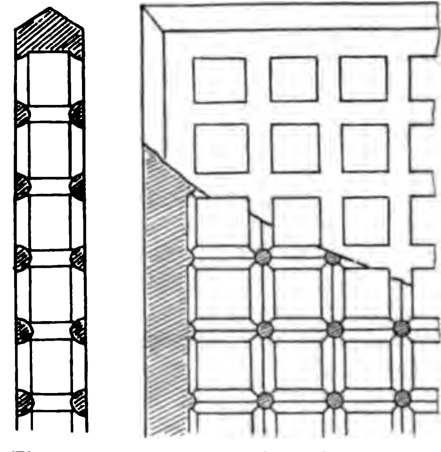


Fig. 371. Fig. 372.
Gitter von G. Hagen.

Eine Vereinigung des Plantéschen und Faureschen Verfahrens bildete das Tudorverfahren, das Platten mit feinen Rippen für die ersten Jahre des Gebrauches der Batterie mit aufgetragener Masse versah; etwa nach zweijährigem normalen Gebrauch sollte sich aus dem massiven Blei so viel wirksame Masse gebildet haben, daß sich die aufgetragene Masse durch den Gasungsvorgang allmählich in Form feiner Stäubchen ablösen und zu Boden setzen durfte.

Es hat sich herausgestellt, daß der Formationsvorgang des Bleies bei Verwendung reiner Schwefelsäure sehr langsam vor sich geht (Passivität), was für den Gebrauch einer Batterie erwünscht ist, da die Platten andernfalls bald gänzlich in wirksame Masse umgesetzt werden und zerfallen würden. Stärkere Bleiadern der Platten (Rippen, Ränder usw.) dienen außer dem Zusammenhalten auch zur Stromverteilung innerhalb der Platte. Ganz läßt sich der Zerstörungsvorgang auch bei reinster Schwefelsäure nicht vermeiden, falls dagegen besondere Stoffe in der Schwefelsäure enthalten sind, z. B. Spuren von Salpetersäure, von Chlor und Chlorverbindungen, geht die Zerstörung im Gebrauch schneller vor sich. Solche Unreinigkeiten sind daher peinlich fernzuhalten.

Gegenwärtige Formationsverfahren benutzen geeignete Zusätze (Kaliumperchlorat $KClO_4$, Perchlorsäure $HClO_4$), die dauernd der Batterie schaden würden, zur Beschleunigung des Formationsvorganges, wozu auch noch die Einhaltung bestimmter Stromdichten, Temperaturen usw. gehört, so daß die Herstellung von Platten nach dem Plantéverfahren ohne allzu großen Zeitaufwand ermöglicht wird. Die gegenwärtige Akkumulatorentechnik verwendet normalerweise als positive Platten Plantéplatten, die nach diesem Verfahren formiert sind, als negative solche mit aufgetragener oder eingebauter Masse. Die Akkumulatorenfabrik A. G. gießt ihre normalen positiven aus Weichblei hergestellten Platten in vorgewärmte Bronzeformen so, daß die Platte etwa bis zu 8-fache Oberflächenentwicklung aufweist. Darunter ist verstanden, daß durch die feinen Bleirippen die tatsächliche Ober-

fläche etwa das 8-fache der äußerlich gemessenen Plattenfläche beträgt. Diese Platte wird entweder einem dreiteiligen Formationsvorgang unterworfen, indem sie zuerst als braune, dann als graue und zuletzt wieder als braune Platte formiert wird; oder man verwendet einen zweiteiligen Vorgang, indem die Platte zuerst an den positiven und dann an den negativen Pol gelegt wird. Im letzteren Falle wird sie als graue Platte geliefert, während die Umwandlung ihrer Masse in Bleisuperoxyd am Bestimmungsorte nach Aufstellung der Batterie vorzunehmen ist. Das Auswaschen der Formationssäure aus den fertigen positiven Platten bildet eine Hauptaufgabe der Akkumulatorenfabrik, da die Lebensdauer einer Batterie davon abhängt. Ungenügend ausgewaschene Platten erkennt man an einer Zelle daran, daß schwer zerplatzende Blasen auf der Oberfläche der Säure schwimmen, die nach Aufstechen einen Chlorgeruch zu erkennen geben. Als negative Platten verwendet die genannte Firma normalerweise Kastenplatten. Ein aus Hartblei (Zusatz von Antimon) hergestellter Rippenkörper trägt beiderseitig unter Vermittlung zweier durchlöcherter, außen liegender Bleibleche in seinen Hohlräumen prismenförmige Stückchen negativer Masse. Die einzelnen Teile der Platte werden durch Bleinieten zusammengehalten. Diese Platte wird unformiert geliefert und am Bestimmungsorte nach Aufstellung der Batterie der Formation in reiner Schwefelsäure unterworfen.

Für die Einrichtung der einzelnen Zelle sind hauptsächlich folgende Punkte maßgebend: Die Oberfläche eines Elementes ist in der Regel so groß, daß die Platten zweckmäßig unterteilt werden müssen. Die positive Platte hat im Gebrauch wesentliche Volumenänderungen durchzumachen; einseitige Beeinflussung würde ein Krummziehen der positiven Platten herbeiführen. Die Platten dürfen nicht bis auf den Grund des Gefäßes reichen, da sie durch herabfallende Masse kurzgeschlossen werden würden; sie werden vielmehr an Bleifahnen aufgehängt, so daß die wirksamen Teile der Platte ganz unter Schwefelsäure stehen. Das Plattensystem darf nicht hart gegen die Gefäßwände drücken, muß vielmehr infolge der eintretenden Volumenvergrößerung der positiven Platten die Möglichkeit einer Verschiebung und Ausdehnung finden, ohne daß die gegenseitigen Abstände der braunen und grauen Platten sich wesentlich ändern. Mit Erfüllung dieser Anforderungen entstehen Zellen der Art, wie sie in einem Beispiel durch Fig. 373 erläutert sein mögen. Die braunen Platten (in der Figur schwarz dargestellt) befinden sich stets zwischen zwei grauen. Eine Volumenvergrößerung der wirksamen Masse führt dadurch unter Vermeidung des Krummziehens nur eine Ausdehnung der Platte herbei.

Die braunen Platten einer Zelle sind miteinander und ebenso die grauen Platten miteinander durch Bleiteile verbunden. Die Verbindung erfolgt durch Bleilötung, die in den Werken gewöhnlich unter Verwendung von Wassergasgebläseflammen, bei der Montage unter Verwendung eines Knallgasgebläses vorgenommen wird. Pollaklot ermöglicht auch die Anwendung des Lötkolbens, was zur Aushilfe willkommen

sein kann, da die Anwendung der Knallgasflamme besondere Übung und Sachkenntnis voraussetzt. Durch die hier angedeutete Unterteilung der Platten kommt man auch bei Anwendung großer Elektrodenoberfläche zu bequemen Formen der Gefäße.

Der gegenseitige Abstand der Platten wird gehalten durch zwischen die einzelnen Platten gestellte Glasrohre. Das Umfallen der Rohre wird auf verschiedene Weise verhütet, worauf Fig. 373 nicht näher eingeht. Damit ein fester seitlicher Druck gegen die Wände des Gefäßes vermieden, aber eine geringe Ausdehnbarkeit des Systems zugelassen wird, wendet man an den entsprechenden Stellen Gummipolster (*g*) oder in bestimmter Weise hergerichtete Bleistreifen (im Aufriß links) an. Fig 373 setzt Stützplatten voraus, an denen die Elektroden hängen (im Seitriß angedeutet). Diese Stützplatten bestehen aus Isoliermaterial, meistens, und zwar immer bei Anwendung von Glasgefäßen, stellt man sie aus Glas her; bei tragbaren Zellen kommen auch Hartgummigefäße und -stützplatten zur Verwendung. Bei Glasgefäßen findet man meistens die Platten am Rande des Gefäßes aufgehängt. Glasgefäße geben der Zelle eine Durchsichtigkeit, die zur Instandhaltung des Akkumulators sehr erwünscht ist. Gefäße in der Größe, daß sie nicht mehr aus Glas vorteilhaft herstellbar sind, werden aus Holz gezimmert und mit einer Bleiauskleidung versehen. Solche Gefäße verlangen in jedem Fall die Anwendung von Stützplatten. Das Durchsuchen der Zellen zu ihrer Instandhaltung erfolgt in diesem Falle von oben unter Anwendung von Spezialglühlampen, die unter die Säure getaucht werden.

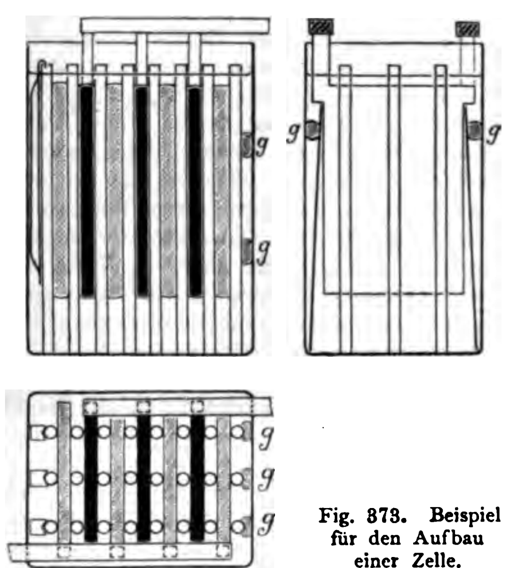


Fig. 373. Beispiel für den Aufbau einer Zelle.

B. Akkumulatorenraum, Aufstellung und Füllung einer Batterie.

Akkumulatorenräume sollen kühl und staubfrei sein und zu keiner anderen Verwendung, als zur Aufnahme der Batterie dienen. In bezug auf bauliche Beschaffenheit sind die Anforderungen zu stellen, daß der Fußboden und seine Übergänge zu den Wänden schwefelsäurefest sein sollen, wozu kaum etwas anderes, als reiner Asphalt, höchstens mit Quarzsandzusatz, in Frage kommt. Der Verputz der Wände und der Decke soll möglichst solid hergestellt und nach völligem Austrocknen

mehrmals mit säurefester Emailfarbe, die speziell für Akkumulatorenzwecke hergestellt wird, gestrichen sein. Eine gute Ventilierung der Akkumulatorenräume ist unerläßlich. Diese Anforderungen ergeben sich daraus, daß gegen das Ende der Ladung eine Gasentwicklung eintritt, bei der Schwefelsäurebläschen mitgerissen werden, die die Wände benetzen.

Die entwickelten Gase, die in besonderen Fällen explosibel sein können (gegen das Ende der Ladung hin entwickelt sich reines Knallgas), machen elektrische Glühlichtbeleuchtung in Akkumulatorenräumen notwendig; die Ausschalter der Lampen werden vorteilhaft außerhalb der Akkumulatorenräume angebracht, oder es müssen besondere säure- und tropfwassersichere Ausschalter verwendet werden. Die Anbringung außerhalb erhöht auch die Sicherheit gegen Zündung eines explosibelen Gasgemisches; aus demselben Grunde ist es gut, bei künstlicher Ventilierung durch elektrisch betriebene Ventilatoren mit Kollektor den Ventilator in den Frischluftstrom zu setzen, so daß er bei offenem Abzug Luft in den Akkumulatorenraum hineindrückt. Auch das Betreten von Akkumulatorenräumen mit offener Flamme und brennender Zigarre ist als Vorsichtsmaßregel zu verbieten.

Die Leitungen in Akkumulatorenräumen werden aus blankem Kupferdraht hergestellt, auf besonders hohen oder mit Traufkante versehenen Porzellanrollen verlegt und mehrmals mit Emailfarbe gestrichen. Die bewegliche Gummiaderschnur der Handlampen (Durchleuchtelampen) wird zweckmäßig mit einem nackten Paragummischlauch geschützt.

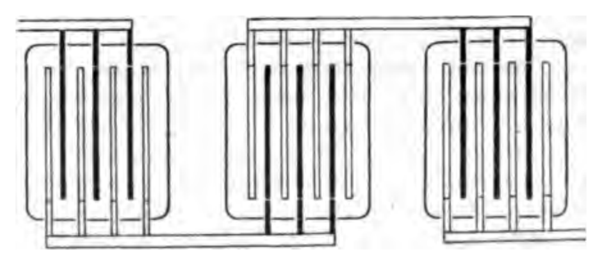


Fig. 374. Quergestellte Platten.

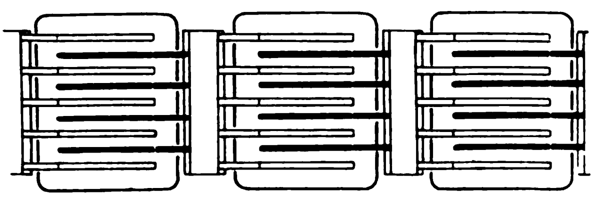


Fig. 375. Längsgestellte Platten.

Die Aufstellung der Akkumulatoren und ihre Verbindung zu einer Batterie erfolgt entweder nach dem Grundrißschema der Fig. 374 oder der Fig. 375. Erstere Anordnung läßt bei Verwendung von Glasgefäßen zu, die Akkumulatoren von den sich bildenden Gängen aus leicht zu durchschauen, während letztere Anordnung den Vorzug geringeren Widerstandes der Verbindungsteile unter Annahme eines bestimmten Gewichtes dieser Teile besitzt.

Es ist zweckmäßig, die Akkumulatoren auf einen starken, mit Schutztränkung versehenen Holzrahmen zu stellen, der mit Glasunterlagen unmittelbar auf dem Fußboden oder mit geringer Erhöhung angebracht ist. Gestelle mit mehreren Stockwerken bilden einen Notbehelf bei Raummangel. Unter die einzelnen Akkumulatorengläser oder -kästen setzt man Porzellanfüße mit Traufkanten, um Erdschlüsse und Entladungen durch benetzte Oberflächen der Gefäße zu verhüten.

Infolge der hohen Anforderungen in bezug auf Reinheit der Schwefelsäure ist nur die besonders zu Akkumulatorenzwecken hergestellte Säure, Füllsäure vom spezifischen Gewicht 1,18 und leichtere Nachfüllsäure (spezifisches Gewicht 1,04), zu verwenden. Die Akkumulatorenfabriken geben den Interessenten Listen derjenigen chemischen Fabriken, die für den Bezug der Akkumulatorensäure empfohlen werden.

Für neuaufgestellte Batterien kommt Füllsäure allein in Frage. Sie wird in die vor der Aufstellung der Zellen gut gereinigten Gefäße bis zu der Höhe eingefüllt, daß über der oberen Plattenkante noch mehrere Millimeter Säure stehen. Auf dieser Höhe ist der Spiegel dauernd zu halten.

Nach dem Füllen der Batterie hat die erste Ladung (die endgültige Formation) zu erfolgen und es gelten hierfür die in dem nächsten Paragraphen enthaltenen Angaben.

Bei der Verdunstung und dem Gasungsvorgang gegen das Ende der Ladung geht stets mehr Wasser verloren, als Schwefelsäure, so daß der Säurestand sich im Laufe der Zeit ändert. Mit dieser Änderung ist nicht zu verwechseln die durch verschiedenen Ladezustand herbeigeführte Änderung, die im nächsten Paragraphen erklärt wird. Eine geladene Batterie soll Säure vom spezifischen Gewicht 1,20 enthalten. Bemerkt man nach einiger Zeit des Gebrauches eine Steigerung des spezifischen Gewichtes über diesen Wert hinaus, so hat man das Nachfüllen entsprechend einzurichten. An Stelle der leichteren Nachfüllsäure wird häufig auch die Anwendung reinen destillierten Wassers ohne Schwefelsäurezusatz erforderlich sein. Vor der Verwendung des Wassers prüfe man wenigstens auf Chlor, das durch Kochsalzgehalt auftreten könnte und peinlich fernzuhalten ist. Man füllt zu diesem Zweck eine Probe des Wassers in ein Reagenzglas, bringt einige Tropfen Silbernitratlösung hinzu und schüttelt das Gemisch. Tritt eine bläulichweiße Trübung ein, so darf das Wasser nicht verwendet werden.

§ 106. Das Laden und Entladen eines Bleiakkumulators bzw. einer Batterie ohne Rücksicht auf einen Zentralenbetrieb.

A. In elektrischer Hinsicht.

Ein betriebsfertiger Akkumulator weist bei Stromlosigkeit eine Spannung in der Nähe von 2 Volt auf, wobei die Zahl 2 zunächst als rohe Annäherung dienen möge. Zum Erreichen einer bestimmten Spannung sind daher für rohe Annäherung so viel Zellen hinterein-

ander zu schalten, als die Zahl 2 in der gewünschten Spannung enthalten ist.

Bei der Ladung muß an die Klemmen der Batterie eine Elektrizitätsquelle (meistens eine Dynamomaschine) gelegt werden, deren Spannung höher ist, als die Spannung der Batterie. Der positive Pol der Batterie wird verbunden mit dem positiven Pol der Stromquelle. In der Leitung befinde sich ein Strommesser und ein Widerstand, mit Hilfe dessen die Stromstärke der Ladung geregelt werden kann. Das Schema der Schaltung drückt Fig. 376 aus, in der M die Stromquelle, B die Batterie, A den Strommesser und V einen auf M oder B umschaltbaren Spannungsmesser bedeuten möge.

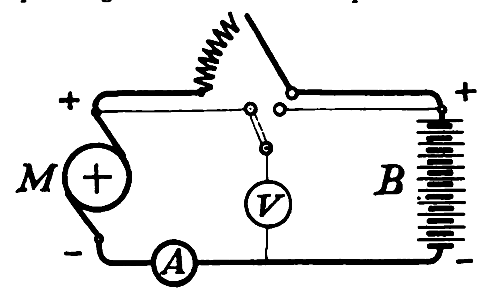


Fig. 376. Ladeschema mit Vorschaltwiderstand.

Nur wenn die Stromquelle eine höhere Spannung zeigt, als die Batterie, darf der Stromkreis geschlossen werden, denn es arbeitet die Stromquelle mit ihrer EMK E gegen die Polarisationsspannung E_P der Batterie. Der Ladestrom hat dabei erstens diese Gegenspannung und zweitens den Gesamtwiderstand des Kreises zu überwinden. Ist w_G dieser Widerstand, und I die Stromstärke, so muß die EMK betragen

$$E = E_P + I \cdot w_G;$$

ohne Rücksicht auf günstige Arbeitsausnutzung genügt also eine passende Wahl von w, die durch den regelbaren Vorschaltwiderstand erreicht werden kann, um bei gegebenem E und E_P einen gewünschten Ladestrom I zu erreichen.

Die beim Fließen eines konstant gehaltenen Ladestromes an den Klemmen eines Akkumulators während der Dauer der Ladung auftretende Spannung verfolgt einen etwa durch Fig. 377 gegebenen Verlauf. Die Spannung steigt von etwa 2,1 Volt aus, die sehr bald nach dem Einschalten erreicht sind, zuerst langsam im Verlaufe mehrerer Stunden. Während des langsamen Anstieges ist keine Gasentwicklung vorhanden. Sie setzt erst im späteren Verlaufe bei Beginn eines deutlicheren Spannungsanstieges ein und nimmt mit höher werdender Spannung bis zu lebhaftem „Kochen“ zu. Gasen alle Elemente an beiden Plattensystemen lebhaft* bei 2,7 Volt an der Zelle, so kann die Ladung abgestellt werden. Nach Unterbrechung des Ladestromes geht die Spannung der Zelle schnell auf 2,2 Volt, nach einigem Stehen auf

* Maßgebend ist das Entweichen reines Knallgases.

2,1 Volt zurück. Ein wesentlicher Rückgang der Spannung des offenen Akkumulators ist von da ab nicht mehr vorhanden.

Die Entladung geschieht, indem ein Außenkreis an die Klemmen des Akkumulators oder der Batterie gelegt wird, dessen Widerstand

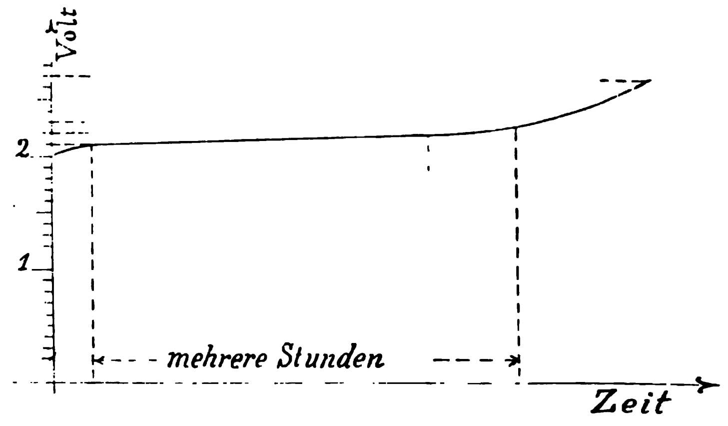


Fig. 377. Anstieg der Ladespannung.

eine solche Größe besitzt, daß bei der Spannung der Batterie sich die gewünschte Stromstärke einstellt. Ist der Widerstand fein regelbar, so kann der Entladestrom in konstanter Höhe gehalten werden. Unter dieser Voraussetzung ändert sich die Entladespannung etwa nach dem

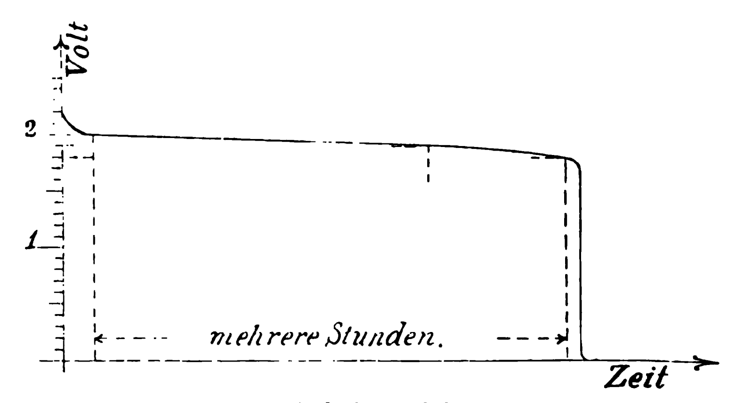


Fig. 378. Abfall der Entladespannung.

mit Fig. 378 gegebenen Schaubild, welches ausdrückt, daß die Spannung zuerst schnell bis in die Nähe von 2 Volt, genauer etwa auf 1,98 Volt, und von da aus langsam im Verlaufe mehrerer Stunden bis 1,8 Volt fällt. Etwa bei 1.9 Volt beginnt ein etwas stärkerer Abfall zu 1,8 Volt

hin. Hat die Zelle 1,8 Volt unterschritten, so fällt die Spannung sehr bald plötzlich zur Null hin. Die Zelle ist entladen.

Die nach Unterbrechen des Entladestromes bei entladenem Akkumulator auftretende Erscheinung, daß die Spannung wieder steigt, ist im Sinne einer Arbeitsabgabe bedeutungslos, da bei einem Versuch einer erneuten Stromentnahme die Spannung sofort wieder abfällt.

Es ist vorteilhaft, Akkumulatoren nur bis 1,8 Volt zu entladen, da eine weitere Entladung der Zelle unzuträglich ist. Um dieser Grenze nicht zu nahe zu kommen, wird meistens die Vorschrift erlassen, nicht unter 1,85 Volt zu entladen. Solche Vorschriften haben ihre Bedeutung, weil nicht alle Elemente einer Batterie zugleich entladen sind, vielmehr sind Verschiedenheiten in bezug auf Menge und gleichmäßiges Arbeiten der wirksamen Masse nicht zu vermeiden. Wird eine Batterie weiter entladen, während einzelne Elemente entladen sind, so lädt der Entladestrom der übrigen Zellen die entladenen Akkumulatoren mit verkehrten Polen, wodurch diese Zellen bald unbrauchbar werden.

Die Umpolung ist das Unzuträgliche. Sie kann, wenn einzelne Elemente einer Batterie zu früh abfallen, vermieden werden, indem diese Elemente einen Nebenschluß, bestehend aus einem kräftigen, durch Klemmen fest angeschlossenen Kupferdraht, kurz vor dem Durchgehen der Spannung durch Null erhalten.

Die Gleichmäßigkeit einer Batterie wird erhalten bzw. gebessert durch Anwendung reichlichen Kochens mit halber Stromstärke vor der Unterbrechung des Ladestromes und durch häufig (alle 2 bis 4 Wochen) wiederholtes Aufladen bei halber Stromstärke mit Ruhepausen von etwa einer Stunde bis zu dem Erfolg, daß sofort nach Einschalten des Ladestromes die Gasung beider Plattensysteme eintritt.

Stromüberlastungen sowohl bei Ladung als auch bei Entladung sind peinlich zu vermeiden, da sich die Platten dadurch werfen. Die Angaben der liefernden Werke in bezug auf zulässige Höchststromstärken sind genau zu nehmen. Innerhalb dieser Grenzen schadet eine reichliche Beanspruchung einer Batterie weniger als eine zu geringe Benutzung.

B. In chemischer Hinsicht.

Zur Erklärung der chemischen Vorgänge bei der Ladung und Entladung seien folgende Formeln herangezogen:

a) Vorgang bei Entladung mit normaler Stromstärke:
braune Platte: $PbO_2 + H_2SO_4 + H_2 = PbSO_4 + 2H_2O$,
graue Platte: $Pb + SO_4 = PbSO_4$.

b) Vorgang bei Ladung mit normaler Stromstärke:
braune Platte: $PbSO_4 + 2H_2O + SO_4 = PbO_2 + 2H_2SO_4$,
graue Platte: $PbSO_4 + H_2 = Pb + H_2SO_4$.

c) Vorgang bei Entladung mit hoher Stromstärke:
braune Platte: $PbO_2 + 2H_2 = Pb + 2H_2O$,
graue Platte: $Pb + 2H_2O + 2SO_4 = PbO_2 + 2H_2SO_4$.

In jedem Falle wird die Schwefelsäure geschieden in 2 H und SO_4: der Wasserstoff wandert mit dem Strome, SO_4 gegen den Strom. Mit dieser Vorstellung werden die obigen Angaben verständlich. Die Vorgänge a) und b) besagen, daß bei der Entladung Bleisulfat und Wasser entsteht, während bei der Ladung Schwefelsäure zurückgebildet wird. Das Bleisulfat soll sich nur in gelöstem Zustande in der Flüssigkeit aufhalten.

Die unter a) und b) angegebenen Veränderungen der Lösung erklären die Erscheinung, daß die Lösung eines entladenen Akkumulators geringeres spezifisches Gewicht besitzt als diejenige eines geladenen. Die Änderung des spezifischen Gewichtes geht allmählich vor sich, so daß eine in die Lösung gebrachte Senkwage (ein Aräometer) Aufschluß über den Ladezustand der Zelle gibt. Der Unterschied im spezifischen Gewicht beträgt einige Zehntel; der erforderliche Säurestand für geladene und entladene Batterie wird häufig an der Senkwage mit Farbe hervorgehoben. Die Dichte der Säure wird so gewählt, daß die Lösung des fertig geladenen Akkumulators das spezifische Gewicht 1,20 (bei 15°) besitzt, weil sich diese Säuredichte in bezug auf die Haltbarkeit der Platten als die günstigste herausgestellt hat. Die Schwefelsäure hat in der Nähe dieser Dichte (bei 1,22) den Höchstwert des spezifischen Leitvermögens, was im Interesse eines geringen inneren Widerstandes der Zelle von Bedeutung ist.

C. In Hinsicht auf entnehmbare und hineinzuschickende Elektrizitätsmenge und Arbeit.

Die dem Akkumulator entnehmbare Amperestundenzahl ist stets geringer als die bei der Ladung hineingeschickte. Der Unterschied ist um so größer, je höher die Stromstärke gewählt ist. Praktisch treten in weiten Grenzen (von Null bis zum höchsten zulässigen Wert) Verschiedenheiten nur bei der Entladestromstärke auf, da für die Ladung zur Zeitersparnis meistens mit höchstem zulässigem Strom gearbeitet wird. Bedeutet I_E den Endladestrom, der für jeden Zeitteil t (z. B. für jede Minute) konstant angesehen sein möge, bedeutet I_L den Ladestrom, der für jeden gleichen Zeitteil t ebenfalls einen beliebigen konstanten Wert haben möge, so wird obige Erscheinung ausgedrückt durch die Ungleichung:

$$\Sigma I_E \cdot t < \Sigma I_L \cdot t.$$

Die Erscheinung erklärt sich dadurch, daß stets ein Teil der Vorgänge sich nach dem Vorgang c) des § 106 B abspielt, ein anderer Teil nach a); der Vorgang a) ist nutzbringend, während der Vorgang c) das Gegenteil von dem herbeiführt, was gewünscht wird: an der braunen Platte (PbO_2) wird Pb erzeugt, an der grauen (Pb) wird PbO_2 erzeugt. Die mit diesen Umsätzen auftretenden Arbeiten erzeugen positive oder negative Wärmemengen. Akkumulatoren nehmen bei der Ladung höhere, bei der Entladung tiefere Temperatur als ihre Umgebung an. Entsprechend der Tatsache, daß einem Akkumulator bei einer be-

stimmten Stromstärke eine bestimmte Elektrizitätsmenge entnommen werden kann, besteht die Auffassung einer Ansammlung von Elektrizitätsmengen in einer Zelle oder einer Batterie wie in einem Kondensator (vgl. § 10); für die entnehmbare Elektrizitätsmenge $\Sigma I_E \cdot t$, ausgedrückt in Amperestunden, wird daher auch das dem Gebiet der Kondensatoren entlehnte Wort „Kapazität" verwendet. Um die Verschiedenheiten der Kapazität für ein und dieselbe Batterie bei verschiedenen Entladezeiten bzw. Stromstärken zu erläutern, sei folgende Zusammenstellung (G. Hagen 1902, Type A, 1 Plattenpaar) gegeben:

Entladezeit	Entladestrom	Kapazität
8 Stunden 10 Minuten	6,25 Ampere	51,0 Amperestunden
5 „ 42 „	8,0 „	45,7 „
3 „ 42 „	11,0 „	40,8 „
2 „ 27 „	14,5 „	35,5 „
1 Stunde 20 „	23,0 „	30,6 „

Das Verhältnis der entnehmbaren und aufzuwendenden Elektrizitätsmengen bei bestimmten Stromstärken:

$$\eta_1 = \Sigma I_E \cdot t : \Sigma I_L \cdot t$$

heißt der Wirkungsgrad in Amperestunden. Er ist kein Wirkungsgrad in mechanischem Sinn, da es sich nicht um den Vergleich zweier Arbeiten handelt. Seine Höhe beträgt für normale ortfeste Batterien mittlerer Größe etwa $\eta_1 = 0,9$.

Bildet man in bezug auf die Ladung und Endladung für jeden Zeitteil t das Produkt aus der Klemmenspannung E' (E'_E für die Entladung, E'_L für die Ladung) und der Stromstärke des Akkumulators, sowie aus dem Zeitteil selbst, so heißt der Wert

$$\eta_2 = \Sigma E'_E \cdot J_E \cdot t : \Sigma E'_L \cdot I_L \cdot t$$

der Wirkungsgrad in Wattstunden. Er bildet einen Wirkungsgrad in mechanischem Sinn und beträgt für normale ortfeste Batterien mittlerer Größe etwa $\eta_2 = 0,75$. Beide Werte η_1 und η_2 sind mit veränderten Stromstärken für eine und dieselbe Batterie verschieden.

Falls für die Schaubilder Figg. 377 und 378 konstante und für Ladung und Entladung gleiche Stromstärke angenommen wird, ist η_2 ausgedrückt durch das Verhältnis der unter der Entladelinie (bis zu 1,8 Volt) und unter der Ladelinie (bis zu 2,7 Volt) liegenden Flächen.

Die Arbeitsverluste im Akkumulator bestehen im wesentlichen aus den Verlusten durch entwichene Ausscheidungsprodukte (beim Kochen), durch Eintreten anderer als der gewünschten chemischen Vorgänge, und durch die infolge inneren Widerstandes auftretende Joulesche Wärme. Die sekundliche Joulesche Wärmemenge wird gebildet durch das Produkt aus dem Quadrate der Stromstärke und dem inneren Widerstande w der Zelle, also durch den Wert $I_L^2 w$ bei der Ladung,

bezw. den Wert $I_E^2\, w$ bei der Entladung. Der Spannungsverlust infolge inneren Widerstandes ist bei der Ladung zur Polarisationsspannung E_P zu addieren, bei der Entladung von E_P zu subtrahieren, damit die Klemmspannung erhalten wird. Es gilt daher für die Klemmenspannungen:

$$E'_L = E_{PL} + I_L \cdot w \quad \text{und} \quad E'_E = E_{PE} - I_E \cdot w\,.$$

Die bei der Ladung auftretende Polarisationsspannung E_{PL}, die als Gegenspannung zu der EMK der Stromquelle auftritt, bildet in ihrem Produkt mit dem Ladestrom I_L die in chemische Form sekundlich übergeführte Arbeit, die, abgesehen von Verlusten an Ausscheidungsprodukten, die Nutzleistung bei der Ladung darstellt. Für den auftretenden Ladestrom ist maßgeblich die Differenz der Ladeklemmenspannung E'_L und der Gegenspannung E_{PL}, sowie der Widerstand w der Zelle:

$$I_L = \frac{E'_L - E_{PL}}{w}\,.$$

Auf die Analogie der Vorgänge im Motoranker sei hier hingewiesen.

Obige Gleichung kann auch auf den ganzen Kreis bezogen werden; für diesen Fall ist an Stelle von E'_L die EMK der Stromquelle und an Stelle von w der Gesamtwiderstand des Kreises zu setzen, während unter E_{PL} die Summe der Polarisationsspannungen sämtlicher hintereinandergeschalteter Elemente zu verstehen ist.

Die Polarisationsspannungen sind veränderlich, und in der Verschiedenheit dieser Werte bei Ladung und Entladung äußert sich elektrisch ein Teil der auftretenden Arbeitsverluste. Der innere Widerstand einer Zelle kann unter Anwendung einer kurzen Unterbrechung des Entladestromes I_E (vgl. § 31, 2. Bsp.) angenähert bestimmt werden, indem man kurz vor der Unterbrechung die Klemmenspannung E'_E und im ersten Augenblick nach der Unterbrechung die Spannung zwischen den Polen der Zelle mißt. Der dazu gebrauchte feine Spannungsmesser bleibt zur ersten und zweiten Messung an den Klemmen der Zelle liegen. Die zu zweit gemessene Spannung kann als die Polarisationsspannung E_{PE} angesehen werden, so daß sich der innere Widerstand der Zelle zu

$$w = \frac{E_{PE} - E'_E}{I_E}$$

ergibt. Der innere Widerstand beträgt bei normalen Akkumulatoren zwischen 0,01 und 0,015 Ohm auf 1 qdm wirksame Fläche. Bei z qdm beträgt er das $1:z$-fache des betreffenden Wertes.

Außer der Höhe der Entladestromstärke ist auch die Temperatur von Einfluß auf die Kapazität, und zwar in dem Sinne, daß eine Erhöhung der Temperatur mit einer Vergrößerung der aufnehmbaren und entziehbaren Elektrizitätsmenge verbunden ist. Die Auffassung ist berechtigt, daß nicht alle wirksame Masse an den Vorgängen teilnimmt,

und daß sich der Prozentsatz der teilnehmenden Masse mit der Temperatur erhöht.

Auf eine Amperestunde rechnet man etwa 0,2 (bis 0,1) kg Plattengewicht für eine ortfeste Zelle, während man in besonderen Fällen bis zu 0,02 kg/Ampst. bei wesentlich kürzerer Lebensdauer der Zelle erreicht. Das auf die Wattstunde bezogene Plattengewicht einer Zelle erhält man durch Division obigen Gewichtes durch die mittlere etwa 1,92 Volt betragende Entladespannung einer Zelle. Die so erhaltene Zahl ist zugleich das auf die Wattstunde bezogene Plattengewicht einer ganzen Batterie.

Die Größe der Platten eines Gefäßes richtet sich nach dem zulässigen Höchstwert der Betriebsstromstärke; es lassen sich hierfür ebenfalls keine bestimmten Zahlen angeben, da die Beanspruchung je nach Bauart der Platten und Zweck der Batterie verschieden ist. Für ortfeste Batterien, deren Lebensdauer etwa 10 Jahre und mehr betragen soll, rechnet man im Mittel auf 1 qdm Stromdurchgangsfläche etwa 1 (bis 1,5) Ampere, während für Fahrzeuge wesentlich höhere Werte (3 bis 5 Ampere auf das Quadratdezimeter bei wesentlich kürzerer Lebensdauer der Zelle) verwendet werden.

D. Fehler und Abhilfsmittel.

Das Bleisulfat (vgl. unter B dieses Paragraphen) kann bei wenig gebrauchten Akkumulatoren auskristallisieren, vor allem, wenn eine völlig oder teilweise entladene Zelle längere Zeit ruht. Die schwer löslichen Kristalle setzen sich in Form von Nadeln an das Plattensystem an und überziehen es mit einer Schicht, die gefährlich ist, da sie isoliert. Sulfatkristalle können Plattenteile und ganze Batterien unbrauchbar machen, da man die Platten schwer wieder von ihnen befreien kann. Teilweise sulfatierte Platten nehmen mit den bedeckten Stellen nicht mehr an den Vorgängen teil und tragen zu einer Überlastung der Platten an anderen Stellen bei. Das einzige Mittel zur Verhütung der Kristalle ist ein reichlicher Gebrauch der Zelle, sofortige Neuladung nach der Entladung und reichliche Überladung mit Ruhepausen (vgl. unter A dieses Paragraphen). Akkumulatoren dürfen unbenutzt nur in völlig geladenem Zustande stehen und müssen zeitweilig, spätestens alle 2 Wochen neu geladen werden. An stark sulfatierten Zellen ist zum Hindurchschicken der normalen Ladestromstärke häufig eine erheblich höhere Spannung anzuwenden als im normalen Zustande. Wenn die Zelle in diesem Falle überhaupt gerettet werden kann, geschieht das nur durch Anwendung des normalen Ladestromes, der die Zelle in besonderen Fällen erheblich erwärmt, nämlich wenn der innere Widerstand durch eine zusammenhängende Kristallschicht wesentlich vergrößert ist.

Besitzt ein Element einen in einer Überbrückung der Säure durch sich lösende Masse oder in einer unmittelbaren Berührung krummgezogener Platten bestehenden Fehler (Kurzschluß im Element), so erkennt man das am Zurückbleiben der Gasung hinter anderen Zellen. Un-

regelmäßigkeiten dieser Art sind im Entstehen der Fehler zu beseitigen, bei krumm werdenden Platten durch vorsichtiges Einschieben passender, an den Enden in einer Flamme abgerundeter Glasstäbe oder Glasröhren, bei entstehenden Bleibäumchen durch Abstoßen dieser Teilchen mittels eines glatten abgerundeten Glas- oder Hartgummistabes. Auf Einhaltung des Plattenabstandes untersucht man vorteilhaft ganze Batterien von Zeit zu Zeit, ehe sich ein Zurückbleiben einstellt.

Schrumpft die Masse, so daß sie mangelnde Verbindung mit dem Bleigerüst erhält, oder werden Teile der Platte durch mangelhafte Stromzuführungswege zu diesen Teilen (zu weites Umsichgreifen der Formation) oder auch durch Sulfatierung von dem Mitarbeiten ausgeschlossen, so hat das dieselbe Wirkung, wie das Fehlen von Masse, nämlich, daß die Kapazität der Zelle dadurch verringert wird. Die Erscheinung hat zugleich die Folge, daß andere Teile übermäßig beansprucht werden, wodurch auch die übrigen Teile der Platten allmählich der Zerstörung anheimfallen. Welches Plattensystem Mangel an mitarbeitender Masse zeigt, das positive oder das negative, erkennt man mittels der Kadmiumprobe: Eine kleine, mit Hartgummirand eingefaßte Kadmiumplatte wird in die Säure oben auf das Plattensystem gelegt. Man mißt von Zeit zu Zeit mit einem Batterieprüfer (Spannungsmesser von 0 bis 3 Volt) die Spannung zwischen der Kadmiumplatte und dem einen oder dem anderen Plattensystem während der Ladung und Entladung. Sind die Änderungen beider Spannungen gegen die Kadmiumplatte während des ganzen Lade- oder Entladevorganges gleichmäßig, so ist das Plattensystem in Ordnung. Plötzliche Änderungen im Verlauf dieser Spannungen gegen eines der Plattensysteme verraten das schlechtere.

Eine negative Platte mit aufgetragener Masse darf aus einer einmal betriebsfertig gemachten Batterie nicht für längere Zeit aus der Schwefelsäure herausgebracht werden. Es würde dabei eine als Verbrennung bezeichnete Erwärmung der Platte auftreten, die einen Teil der im Akkumulator aufgespeicherten Arbeit verbrauchen würde. Bei diesem Verbrennen würde die Masse schrumpfen und der Zustand der Platte in der Regel sich verschlechtern. Negative Platten, die aus einer Zelle herausgenommen werden, bringt man daher zweckmäßig sofort in ein anderes, mit Akkumulatorensäure gefülltes Gefäß.

Es sind Fälle denkbar, daß ein geschickt angewandter Verbrennungsvorgang der negativen Platten die Kapazität einer Zelle vergrößert. Auch Zusätze von Glyzerin zur Akkumulatorensäure haben eine Wirkung in diesem Sinne. Mittel der genannten Art sind jedoch ohne Hilfe der Akkumulatorenfirma nicht anzuwenden, wie überhaupt Akkumulatoren mehr als andere Dinge, die den Betrieben übergeben werden, einer steten Fühlung mit dem herstellenden Werke bedürfen.

Die Gegenwart von Spuren bestimmter Metalle und ihrer Verbindungen wirken auf Akkumulatoren schädigend, von denen hauptsächlich Kupfer und Eisen genannt sei. Eisen gibt den Platten eine

ungewöhnliche rötliche Färbung. Unter Vorhandensein schädlicher Stoffe in einer Zelle läßt sich häufig eine Besserung schaffen, indem der frisch geladene Akkumulator von seiner Säure befreit und mit neuer, reiner Säure gefüllt wird.

§ 107. Die Anwendung der Akkumulatoren und ihre Hilfseinrichtungen im Zentralenbetriebe.

A. Nachweis der Wirtschaftlichkeit.

Die Aufgabe der Akkumulatoren in den gewöhnlichen Zentralenbetrieben besteht darin:

1. Zu Zeiten geringen Strombedarfes ohne Maschinenbetrieb, also bei ruhender Anlage, Leistung an das Netz abzugeben.
2. Zu Zeiten höchsten Strombedarfes parallel mit der Maschinenanlage zur Unterstützung der letzteren Leistung an das Netz abzugeben.
3. Bei kurzzeitigen Betriebsstörungen an der Maschinenanlage für diese Zeit die ganze Stromlieferung an das Netz zu übernehmen.
4. Pufferbatterie: An Zentralen mit stark wechselnder Leistungsabgabe durch Parallelschaltung mit der Maschinenanlage in kurzzeitigen Perioden bald Arbeit aufzunehmen, bald Arbeit abzugeben zum Zweck eines Ausgleiches der Maschinenleistung.

Letzterer Punkt kommt hauptsächlich für Straßenbahnzentralen in Frage. Durch den Spannungsabfall bei höherer Belastung einer Nebenschlußmaschine und durch die Spannungssteigerung bei Entlastung einer Nebenschlußmaschine geht der Ausgleich bei günstig gewählter Zellenzahl selbsttätig vonstatten. Punkt 3 gilt gemeinsam für Beleuchtungs- und für Straßenbahnzentralen, während die Punkte 1 und 2 hauptsächlich für Lichtanlagen Bedeutung haben. Punkt 1 gilt für Straßenbahnzentralen höchstens für den Betrieb einzelner Wagen während der Nachtzeit.

Die Wahl der Größe der Batterie in bezug auf die höchste Entladestromstärke und die Zeit der Beanspruchung mit höchstem Entladestrom richtet sich nach den Bedürfnissen des einzelnen Falles. Als Mittelwert möge der Fall gelten, daß der höchste Entladestrom etwa die Hälfte des höchsten Maschinenstromes betrage

Wirtschaftlich sind Akkumulatoren, wenn durch sie der Preis der Kilowattstunde nicht zu sehr erhöht wird, oder wenn die durch sie herbeigeführte Preiserhöhung im Einklange mit dem erzielten Erfolge steht. Für gut eingerichtete, wirtschaftlich betriebene Zentralen möge bei tagsüber angenähert gleichmäßiger Stromabgabe etwa mit den Selbstkosten von 8 Pf für die der Maschine entnommene Kilowattstunde gerechnet werden.

Berücksichtigt man nur den Wirkungsgrad* der Akkumulatoren, der zu $\eta = 0{,}75$ angenommen sein möge, so beträgt dadurch schon

* In Wattstunden.

der Preis der den Akkumulatoren entnommenen Kilowattstunde in Selbstkosten $8:0{,}75 = 10{,}7$ Pf. Rechnet man ferner den mittleren Anschaffungspreis des Plattensystemes bezogen auf die Kilowattstunde zu 100 M und die Lebensdauer der Batterie zu 10 Jahren, so ist für Ersatz der Batterie bei täglich einer ganzen Entladung ein Betrag

$$\frac{100}{10 \cdot 365} = 0{,}027 \text{ M oder } 2{,}7 \text{ Pf}$$

dem Preis der Kilowattstunde zuzuschlagen, so daß dafür $10{,}7 + 2{,}7 = 13{,}4$ Pf entstehen. Wird die Batterie seltener oder weniger entladen, so daß in z Tagen eine der völligen Entladung entsprechende Arbeit abgegeben wird, so beträgt der Zuschlag an Stelle der 2,7 Pf den z-fachen Wert, da die Lebensdauer einer Batterie durch geringen Gebrauch nicht (wesentlich) erhöht wird. Wird z. B. täglich nur $^1/_3$ der Ladung entnommen, so steigen die Selbstkosten der den Akkumulatoren entnommenen Kilowattstunde schon auf 18,8 Pf.

Es kommen für solche Betrachtungen noch mehr Dinge in Frage, die meistens außerhalb der rechnerischen Zugängigkeit liegen und sich nur auf bestimmte Voraussetzungen aufbauen lassen; da für mittlere Verhältnisse hier gerechnet werden soll, kann darauf nicht weiter eingegangen werden. Jedenfalls weist die Rechnung den Weg, wie die Verteuerung der Arbeit gegen den Vorteil einer durch Akkumulatoren stets betriebsbereit gehaltenen Anlage ermittelt werden kann Einerseits zeigt die Rechnung, daß eine günstig bemessene Batterie keine unverhältnismäßig große Verteuerung des Betriebes herbeiführt. Der Hauptpunkt liegt im reichlichen aber ordnungsmäßigen Gebrauche der Batterie. Täglich eine nahezu gänzliche nutzbringende Entladung mit unmittelbar sich daran anschließender Neuladung kann als günstigster Fall angesehen werden. Anderseits legt es die Betrachtung nahe, bei geringem und nur ausnahmsweise oder vorübergehend auftretendem Strombedarf während der Pausen des Maschinenbetriebes lieber auf die Möglichkeit der Stromentnahme in dieser Zeit zu verzichten, als zugunsten geringer Bequemlichkeit in der Stromentnahme den Betrieb der Anlage dauernd unbequem zu machen.

Von den öffentlichen Gleichstromzentralen Deutschlands besitzen etwa 94 bis 95% Akkumulatoren.

B. Wahl der Zellenzahl im gewöhnlichen Zentralenbetriebe, Hilfseinrichtungen.

Der gewöhnliche Zentralenbetrieb stellt die Anforderung, in jeder Belastung eine konstante oder zwischen zwei nahe beieinander liegenden Werten angenähert konstante Netzspannung zu halten. Als zulässige Spannungsschwankung rechnet man 2% des Mittelwertes.

Eine Batterie muß in der Zellenzahl so bemessen sein, daß sie gegen das Ende der Entladung bei höchstem Entladestrome noch die Netzspannung herstellt. Da die einzelne Zelle normal bis 1,85, im

äußersten bis zu 1,8 Volt entladen werden soll, ergibt sich die erforderliche Zellenzahl zu

$$z = \frac{E'}{1,85} \text{ bis } \frac{E'}{1,80},$$

wobei E' die Netzspannung in Volt bedeutet.

Da die Spannung der Zelle im Betriebe veränderliche Werte annimmt, ist durch besondere Mittel dafür zu sorgen, daß die Netzspannung angenähert konstant gehalten werden kann. Man erreicht das durch Anwendung eines Zellenschalters. Er besteht aus einer Schaltvorrichtung, die es gestattet, während des Betriebes die zwischen zwei Leitungsdrähten liegende Zellenzahl zu verändern. In der Nähe von 100 Volt wird zu diesem Zweck an einem Ende der Batterie von jedem Verbindungsstück zwischen zwei Zellen je eine Leitung abgezweigt; die einzelnen Leitungen führen in der Reihenfolge, wie sie von den Akkumulatoren kommen, zu den einzelnen Knöpfen einer Kontaktbahn, über die eine Kurbel oder ein geradlinig geführtes Kontaktstück gleiten kann. Damit keine Stromunterbrechung beim Verstellen von Knopf zu Knopf eintritt, muß die Kontaktbreite des Gleitstückes größer sein, als die Breite des Isoliermateriales zwischen den einzelnen Knöpfen. Damit ein unmittelbarer Kurzschluß der durch das Gleitstück geschlossenen Zelle in der Übergangsstellung vermieden ist, wird das Gleitstück zweiteilig hergestellt. Der Hauptkontankt des Gleitstückes wird mit der Netzleitung unmittelbar, der Hilfskontakt hingegen unter Vorschaltung eines Widerstandes verbunden; dieser Widerstand ist so bemessen, daß mit der Spannung zwischen zwei Knöpfen der Kontaktbahn der höchstzulässige Entladestrom entsteht. Die Entladeschaltung wird verdeutlicht durch das Schema Fig. 379, das für Netzspannung in der Nähe von 100 Volt und für einen Kurbelzellenschalter Gültigkeit hat. Ist das Kontaktstück geradlinig beweglich bei gerader Kontaktbahn, so entsteht der Spindelzellenschalter. In der Nähe von 200 Volt, wo 2 % der Netzspannung ~ 4 Volt beträgt, legt man zwischen zwei benachbarte Kontakte stets zwei hintereinandergeschaltete Zellen.

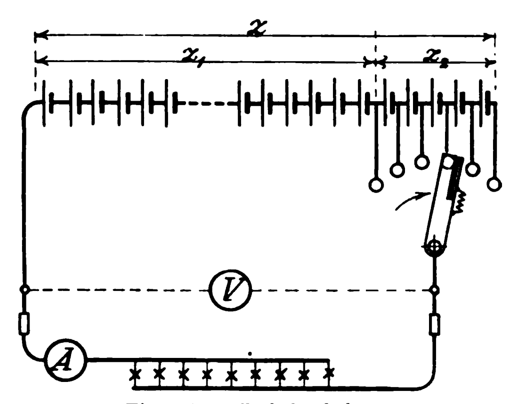


Fig. 379. Entladeschaltung.

Der Schiebekontakt des Zellenschalters darf in Zwischenstellung nicht stehen bleiben, da in diesem Falle das durch den Schiebekontakt in sich geschlossene Element schnell entladen wird. Eine Ladung

eines einzelnen Elementes in Reihe mit anderen nicht entladenen Zellen ist mit Umständen verbunden. Die im Betrieb vorkommenden Ruhestellungen des Gleitstückes werden an den Zellenschaltern durch besondere Mittel kenntlich und leicht einstellbar gemacht. Die räumlichen Abmessungen müssen mit den Bezeichnungen der Fig. 380 folgenden Bedingungen genügen:

$$c < b;\ e < b;\ d < a;\ (c + d + e) > b;\ (a + b) > (c + d + e).$$

Die am Zellenschalter liegenden Elemente heißen die Schaltzellen, die übrigen die Stammbatterie. Die Zellenzahl der Stammbatterie erhält man (falls während der Ladung kein Strom an das Netz von den Akkumulatoren aus abgegeben werden soll*), indem man die Netzspannung durch die Spannung der neu geladenen Zelle dividiert; man rechnet hierfür 2,1 Volt, oder, da sehr bald nach Einschaltung des Entladestromes die Spannung der Zelle um etwa 0,1 Volt fällt, häufig auch 2,0 Volt. Mit der Bezeichnung der Fig. 380 wird die Zellenzahl der Stammbatterie daher

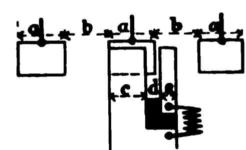


Fig. 380. Zellenschalter-Gleitkontakt.

$$z_1 = \frac{E'}{2,1} \text{ bis } \frac{E'}{2,0},$$

während als Zellenzahl der Stammbatterie die Differenz

$$z_2 = z - z_1$$

zu rechnen ist. Die erforderliche Zahl der Zellenschalterkontakte und Zellenschalterleitungen wird hiermit

in der Nähe von 100 Volt: $z_2 + 1$,

„ „ „ „ 200 „ : $\frac{z_2}{2} + 1$;

im letzteren Falle ist z_2 auf eine gerade Zahl abzurunden.

Welche Werte für z und z_1 in den angegebenen Grenzen gewählt werden, richtet sich nach dem besonderen Fall. Jedenfalls folgt aus der Wahl des geringsten z und des größten z_1 die geringste Anzahl von Zellenschalterleitungen, die bei größeren Abständen zwischen Batterie und Schalttafel häufig die Kosten der Anlage merkbar erhöhen.

Der Akkumulatorenbetrieb unter Anwendung eines Zellenschalters ist so zu denken: Bei neu geladener Batterie beginnt die Entladung, indem der Gleitkontakt des Zellenschalters auf geringster Zellenzahl steht. Nimmt durch die Entladung die Spannung der Batterie ab, so stellt man, falls der zulässige Geringstwert der Netzspannung erreicht ist, das Gleitstück auf den benachbarten Knopf der Kontaktbahn zu nächst höherer Zellenzahl ein. Unter Beobachtung der Netzspannung

* Vgl. § 111.

wiederholt sich dieser Vorgang, bis bei entladener Batterie das Gleitstück auf dem äußersten Knopf der Kontaktbahn steht, wo die Zellenzahl am größten ist.

Die Ladung erfolgt vorteilhaft, indem man mit der zuletzt genannten Stellung des Gleitstückes beginnt, denn die äußerste Zelle hat die geringste Amperestundenzahl abgegeben und kocht daher am ersten. Ist die äußerste Zelle fertig geladen, so stellt man das Gleitstück auf den zweitletzten Kontakt. Unter Beobachtung des Ladezustandes der jeweils letzten angeschlossenen Elemente verfährt man so weiter, bis schließlich gegen das Ende der Ladung nur noch die Stammbatterie angeschlossen ist. Gast diese gut, so ist die Ladung beendet.

Meistens wird die ladende Maschine so eingerichtet, daß sie imstande ist, bei normalem Ladestrom und 2,7 Volt jeder Zelle alle vorhandenen Zellen in Hintereinanderschaltung zu laden. Ihre Spannung muß demnach beim Ladestrom bis auf $z \cdot 2{,}7$ Volt gebracht werden können. Wenn $z = E' : 1{,}8$ gewählt wird, so folgt, daß der Höchstwert der Ladespannung $2{,}7 : 1{,}8$ oder $^3/_2$ der Netzpannung beträgt. Dieser Punkt ist ungünstig, falls dieselbe Maschine die Ladung besorgen soll, die auch für das Arbeiten auf das Netz verwendet wird. Eine Maschine, die bei gleicher Umlaufszahl für zwei um $50\,^0/_0$ auseinanderliegende Spannungen eingerichtet ist, besitzt bei der niederen Spannung schneller abfallende, also ungünstigere Charakteristiken, als eine Maschine, die nur für Netzspannung eingerichtet ist; der Nebenschlußregler solcher Maschinen enthält viel Widerstand und braucht eine große Anzahl von Kontakten. Erhöhte Umlaufszahl bei Akkumulatorenladung führt auch zu umständlichen Einrichtungen.

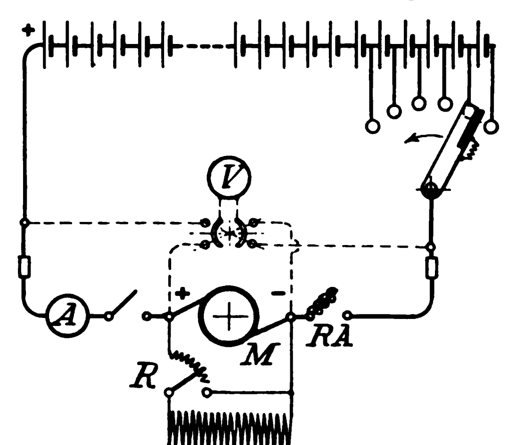


Fig. 381. Ladeschaltung.

Etwas gebessert werden diese Verhältnisse durch den oben angegebenen Gebrauch des Zellenschalters bei der Ladung, indem man so geringerer Spannungserhöhung bedarf, da gegen das Ende der Ladung eine Anzahl von Elementen abgeschaltet ist. Außerdem bessert diese Verhältnisse die Anwendung der halben Ladestromstärke bei Beginn der Gasung.

Die Ladung erfolgt nach dem Schema der Fig. 381, zu dem folgende Punkte hervorgehoben sein mögen:

Gegen das Ladeschema Fig. 376 fehlt in dieser Schaltung ein

besonderer vorgeschalteter Widerstand, der bei günstigem Betrieb deshalb fortfallen muß, weil er unnötig die Ladespannung der Maschine erhöhen und Arbeit in Wärme, also eine nicht bezweckte Arbeitsform umsetzen würde. Der Gesamtwiderstand w_G des Kreises besteht nur aus der Summe der Widerstände der für die Schaltung notwendigen Teile, im wesentlichen des Maschinenankers, der Leitung und der Batterie. Alle diese Widerstände werden so gering wie möglich gehalten. Das zur Einstellung der Ladestromstärke dienende Mittel ist der Nebenschlußregler R der Maschine M.

Durch dieses Verfahren wird der für die Ladestromstärke I_L maßgebliche Spannungsverlust e_V des Kreises sehr gering im Vergleich zur EMK E und zur Polarisationsspannung E_{LP} des Kreises. Der Ladestrom

$$I_L = \frac{E - E_{PL}}{w_G} = \frac{e_V}{w_G}$$

ist dadurch bei konstantem E_{PL} und geringer Veränderung von E großen Schwankungen ausgesetzt. Das Einstellen des Nebenschlußreglers hat daher sehr vorsichtig zu erfolgen. Vor dem Einschalten des Ladestromes ist mit einem und demselben Spannungsmesser V unter Benutzung eines Spannungsmesserumschalters zunächst die Spannung der Batterie abzulesen und dann die Spannung der ladenden Maschine einzustellen. Die Spannung der ladenden Maschine darf nur ein wenig höher sein, als die Akkumulatorenspannung. Erst wenn diese Bedingung erfüllt ist, wird der Ladestromkreis geschlossen und seine Stromstärke geregelt.

Der Strommesser A, der in Fig. 379 und Fig. 381 derselbe sei, ist als Instrument nach dem Deprez-d'Arsonvalsystem mit Nullstellung in der Mitte zu denken, damit je nach der Ausschlagsrichtung erkannt wird, ob Ladung oder Entladung vorliegt. Ist er ein von der Stromrichtung unabhängiges Instrument, so ist außer ihm ein Stromrichtungszeiger im Kreise zu verwenden.

Der Ladekreis enthält einen Rückstromausschalter RA, der entweder ein Minimalautomat oder besser ein mit zwei Spulen arbeitender Automat (vgl. Anforderung 4 und zugehörige Bemerkungen in § 44) sein kann. Er wird notwendig, da bei geringen Verkleinerungen der EMK der Maschine oder bei allmählichem Steigen der EMGK der Batterie ohne Nachregelung des Ladestromes eine Umkehr der Stromrichtung eintreten kann. Dieser Umkehr geht ein Durchgang durch die Stromstärke Null voraus, der dann eintritt, wenn in obigem für I_L gegebenen Ausdruck $E = E_{PL}$ wird. Da die Differenz $E - E_{PL}$ stets einen geringen Wert aufweist, können geringe durch Zufälligkeiten auftretende Schwankungen der Umlaufszahl die Gleichheit von E und E_{PL} herbeiführen. Wird nach diesem Augenblick die Induktionsspannung der Maschine nur noch um ein geringes kleiner, so überwiegt die Polarisationsspannung der Akkumulatoren, die dadurch zur EMK des Kreises wird, während die Induktionsspannung der Maschine eine Gegen-

spannung bildet. Die Stromrichtung kehrt sich um, und die Akkumulatoren entladen sich in die Maschine hinein, die nun als Motor läuft. Die als Motor getriebene Nebenschlußmaschine läuft zwar im gleichen Sinn, wie vorher, denn das Feld behält die Richtung bei und die elektrischen Pole am Anker bleiben auch gleich, so daß man annehmen müßte, bei einer vorübergehenden Schwankung würden die Akkumulatoren über die Schwankung hinweghelfen, aber die Maschine nimmt leicht Strom aus den Akkumulatoren auf, der gefährliche Höhe bekommen würde, falls er nicht vorher durch Selbstschalter unterdrückt werden sollte. Das Anwachsen dieses als Rückstrom bezeichneten Entladestromes hat vor allem seinen Grund darin, daß die Ankeramperewindungen sich umkehren. Der erst beim belasteten Generator im Sinne des Umlaufes verschobene Kraftfluß, für den auch die Bürsten eingestellt sind, verschiebt sich mit auftretendem Rückstrom gegen den Umlauf, während die Bürsten ihre alte Stellung beibehalten. Die im Falle des belasteten Generators entmagnetisierenden Ankerwindungen (vgl. Fig. 261) magnetisieren zwar jetzt im gleichen Sinne, wie die Feldspulen, aber in diesem Kraftfluß stehen die Bürsten an einer ungünstigen Stelle, so daß die Induktionsspannung des Ankers mit Umkehr des Ankerstromes sich selbst verringert, während das Gegenteil zur Verhütung des Rückstromes erwünscht wäre. Durch die Verschiebung zwischen Bürstenstellung und Kraftfluß ist die Wirkung vorhanden, als befände sich der Anker in einem zu schwachen magnetischen Felde.* Er strebt dadurch nach Vergrößerung der Umlaufszahl und wirkt treibend auf die Antriebsmaschine, die dadurch das motorische Mittel absperrt und bei einmal entstandenem Rückstrom eine sich vergrößernde Belastung auf die elektrische Maschine wälzt. Die unter diesen ungünstigen Umständen laufende elektrische Maschine feuert stark, ihr Kollektor verliert die glatte Oberfläche, ihre Bürstenschleifflächen brennen aus, ihr hoher Strom schadet den Akkumulatoren und der Ankerwicklung. Gewöhnlich treten die Schmelzsicherungen des Kreises schnell in Tätigkeit und unterdrücken das beginnende Zerstörungswerk, das dann seinen Anfang findet, wenn der Selbstschalter versagen sollte.

Bei der Verwendung von Nebenschlußmaschinen kann der Betrieb ohne weiteres von neuem beginnen, falls einmal bei versagendem Selbstschalter ein Rückstrom durch die Sicherungen ohne Schädigung der Anlage unterbrochen worden sein sollte. Doppelschlußmaschinen hingegen polen sich gewöhnlich beim Rückstrom um, da die im Hauptschluß liegenden Feldwindungen eine gegen die normale stark erhöhte Stromstärke führen und mit ihrer Amperewindungszahl gegen die Nebenschlußamperewindungen überwiegen.** Erneute Erregung und

* Oder, was auf dasselbe hinausläuft, als liefe er mit verringerter, in der Induktionswirkung hintereinandergeschalteter Zahl von Ankerdrähten.

** Dieselbe Erscheinung des Umpolens tritt auch ohne Vorhandensein von Akkumulatoren bei Doppelschlußmaschinen auf, wenn an der unter Strom stehen-

erneuter Anschluß würde eine Hintereinanderschaltung von Maschine und Akkumulatoren zur Folge haben, wodurch beim Anschließen der vermeintlichen Ladeschaltung ein Kurzschluß mit doppelter Spannung entstehen würde. Bei Verwendung eines Spannungsmessers nach dem Deprez-d'Arsonvalsystem erkennt man den Fehler, indem der Zeiger des auf die Maschine geschalteten Instrumentes entgegengesetzt ausschlägt, hingegen verrät sich die Ummagnetisierung bei Verwendung der übrigen (Weicheisen-, Hitzdraht- [und dynamischen]) Instrumente vor dem Anschließen nicht. Man kann mit abgehobenen Bürsten und unter Anwendung eines Nebenschlußreglers mit funkenloser Abschaltung die Maschine meistens auf einfache Weise ohne Schaltungsänderung von den Akkumulatoren aus wieder auf die richtige Polarität bringen, indem man nach dem Abheben der Bürsten die Reglerkurbel auf Ausschaltstellung bringt, dann die Maschinenhebel, etwaige sonst zur Ladung einzulegende Akkumulatorenhebel und den Rückstromausschalter einlegt (letzterer ist dabei festzuhalten) und hierauf die Reglerkurbel einmal langsam über ihre Kontaktbahn hin und her bewegt. Der Rückgang geschieht in der Reihenfolge: Reglerkurbel in Ausschaltstellung bringen, Rückstromausschalter, Maschinen- und Akkumulatorenhebel herausziehen, Bürsten neu auflegen!

Um Umständlichkeiten dieser Art zu vermeiden, wendet die Praxis in Verbindung mit Akkumulatoren meistens nur Nebenschlußmaschinen an.

An Stelle eines Rückstromausschalters kann auch in besonderen Fällen eine Eisen-Aluminiumzelle mit geeignetem Elektrolyten treten. Sie läßt im wesentlichen Strom nur nach einer Richtung durchtreten, nämlich in derjenigen, die Sauerstoff am Eisen erzeugt. Tritt bei umgekehrter Stromrichtung Sauerstoff am Aluminium auf, so überzieht sich letzteres mit einer Oxydhaut, die den Strom nicht leitet, und die erst durch eine erneute Umkehr wieder zerstört wird.

13. Kapitel.

Gleichstromzentralen.

§ 108. Anlage mit einer Nebenschlußmaschine.

Das Schema der Schaltung ist bereits durch die frühere Fig. 251 (S. 270) ausgedrückt. Mit Rücksicht darauf, daß es üblich ist, mehrere Verteilungsleitungen von einer Zentralanlage ausgehen zu lassen, und zur

den Maschine (etwa durch Zufälligkeiten oder durch unrichtige Einstellung des Nebenschlußreglers) der Nebenschlußstrom zu sehr geschwächt oder gar unterbrochen wird, während Nebenschlußmotoren an dem Netz hängen, oder während ein Parallelbetrieb mit anderen Maschinen vorliegt.

Vorbereitung für die Darstellungsweise der folgenden Abschnitte sei obiges Schema in veränderter Form mit Fig. 382 wiederholt. Darin bedeutet:

M die Nebenschlußmaschine,
R den Nebenschlußregler,
MS die Maschinensicherung (zweipolig),
MH den Maschinenhebel (zweipolig),
V den Spannungsmesser,
A den Strommesser,
SS die Sammelschienen,
VL die Verteilungsleitungen mit Sicherungen und Ausschaltern.

Nebenschlußregler, Maschinensicherungen, Maschinenhebel, Spannungsmesser, Strommesser, Sammelschienen und die Ausschalter und Sicherungen der Verteilungsleitungen sind gewöhnlich an einer Schalttafel vereinigt. Die zur Bedienung erforderlichen Teile liegen an der Vorderseite, die Sammelschienen und die Spiralen des Nebenschlußreglers, in manchen Fällen auch die Sicherungen, an der Rückseite.

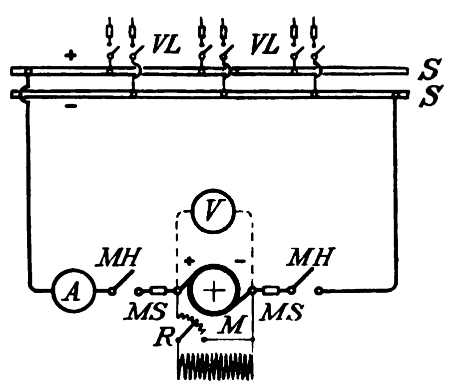


Fig. 382. Schema einer Anlage mit Nebenschlußmaschine.

Vorteilhaft wird der Spannungsmesser in Augenhöhe über der Kurbel des Nebenschlußreglers angebracht, damit die Wirkung des Verstellens der Kurbel bequem erkennbar ist.

Für Schalttafeln vorliegender Art gelten außer früher im Gebiet der Leitungen erledigten Punkten folgende Regeln bei Niederspannungsanlagen, die hier allein berücksichtigt sein mögen:

Schalttafeln müssen aus feuersicherem Material bestehen. Holz ist als Umrahmung und als Schutzgeländer zulässig.

Bei Schalttafeln, die betriebsmäßig auf der Rückseite zugänglich sind, wird die Entfernung zwischen ungeschützten, Spannung gegen Erde führenden Teilen der Schalttafel und der gegenüberliegenden Wand in der Regel nicht weniger als 1 m gewählt. Sind an der letzteren ungeschützte Teile genannter Art in erreichbarer Höhe vorhanden, so muß die wagerechte, gegenseitige Entfernung dieser Teile etwa 2 m betragen und der Zwischenraum durch Geländer geteilt sein.

Schalttafeln, die nicht von der Rückseite aus zugänglich sind, müssen so eingerichtet sein, daß die Anschlüsse der Leitungen nachgesehen werden können.

Die Polarität von Leitungsschienen ist durch farbigen Anstrich kenntlich zu machen.

Es ist zweckmäßig, bei weniger einfachen Schaltungen sämtliche. für die Bedienung vorhandene Teile, als Ausschalter, Sicherungen, Nebenschlußregler, Zellenschalter, Anlasser usw. mit Schildchen zu versehen, die den Zweck und die Zugehörigkeit dieser Teile durch einfache Zeichen, etwa nach Art der in diesem Kapitel verwendeten Buchstaben, andeuten.

A. Ansetzen des Betriebes.

Vor dem Ansetzen sind Maschinenhebel und Nebenschlußregler in Ausschaltstellung. Es folgt das Anlassen der Arbeitsmaschine und des Stromerzeugers. Darauf wird die Kurbel des Nebenschlußreglers so eingestellt, daß der Stromerzeuger sich erregt; wenn nötig, ist dazu der ganze Vorschaltwiderstand des Nebenschlußreglers durch entsprechende Kurbelstellung abzuschalten. Nach erfolgter Erregung wird die Kurbel so eingestellt, daß der Spannungsmesser die höchste zulässige Betriebsspannung anzeigt, d. h. etwa 1 % mehr, als die mittlere normale Spannung. Schließlich wird der Maschinenhebel eingelegt und die Spannung, wenn erforderlich, nochmals geregelt.

Die Reglerkurbel ist langsam und vorsichtig unter Beobachtung der Spannung von Knopf zu Knopf zu verstellen, da die Wirkung des Verstellens zeitlich, oft mehrere Sekunden, zurückbleibt.

B. Betrieb (vgl. § 81, B).

Bei steigender Belastung stellt man jedesmal dann, wenn der zulässige Geringstwert der Betriebsspannung (etwa 1 % unter dem mittleren Normalwert) erreicht ist, die Reglerkurbel so ein, daß der zulässige Höchstwert von neuem hergestellt wird. Bei abnehmender Belastung regelt man, wenn das zulässige Höchstmaß der Spannung erreicht ist, auf den zulässigen Geringstwert ein.

C. Abstellen des Betriebes.

Das Abstellen erfolgt in der Regel, d. h. mit Ausnahme dessen, daß Betriebsunfälle vorliegen, wenn am Strommesser erkannt wird, daß keine Lampen und sonstige Stromverbraucher mehr angeschlossen sind.

Zum Abstellen wird die Reglerkurbel in Ausschaltstellung gebracht und dann der Maschinenhebel herausgezogen. Erst darauf erfolgt das Abstellen der Stromerzeuger- bzw. Antriebsmaschine. Ist der Nebenschlußregler nicht für funkenlose Abschaltung eingerichtet, so empfiehlt es sich, zuerst den Stromerzeuger stillzusetzen und dann erst den Nebenschlußregler zu unterbrechen.

D. Anwendungsgebiet.

Das hier vorliegende Schema ohne Akkumulatoren empfiehlt sich in allen Fällen, wo zu bestimmter Zeit eine allgemeine Einschaltung der Beleuchtungsanlage und ebenso nach dem Lichtbetrieb eine allgemeine Ausschaltung erfolgt, ohne daß in der Zwischenzeit Strombedarf eintritt. Es gehört dazu, daß die Antriebsmaschine stets betriebsbereit ist. Am häufigsten liegen diese Verhältnisse bei Fabrik-

anlagen vor ohne Anschluß von Privaträumen. Ist keine dauernd in Betrieb befindliche Kraftanlage vorhanden, so empfiehlt sich als Antriebsmaschine der steten Betriebsbereitschaft wegen ein Leuchtgasmotor.

§ 109. Anlage mit mehreren Nebenschlußmaschinen ohne Akkumulatoren.

Dieser Paragraph dient hauptsächlich zur Erklärung des Parallelbetriebes zweier oder mehrerer Maschinen. Die Verwendung mehrerer Maschinen kommt gewöhnlich nur bei größeren Anlagen vor, die dann auch mit Akkumulatoren ausgerüstet sind. Die Kombination der Gegenstände dieses Paragraphen mit Akkumulatoren ist nach Erledigung der folgenden Paragraphen ohne weiteres möglich.

Zwei oder mehrere Maschinen, gewöhnlich auch für verschiedene Leistungsabgabe bemessen, sind am Platze, wo zu bestimmten Tageszeiten wenig Strom gebraucht wird, während zu anderen Tageszeiten erheblich größere Beanspruchung der Zentrale eintritt. Auch wird

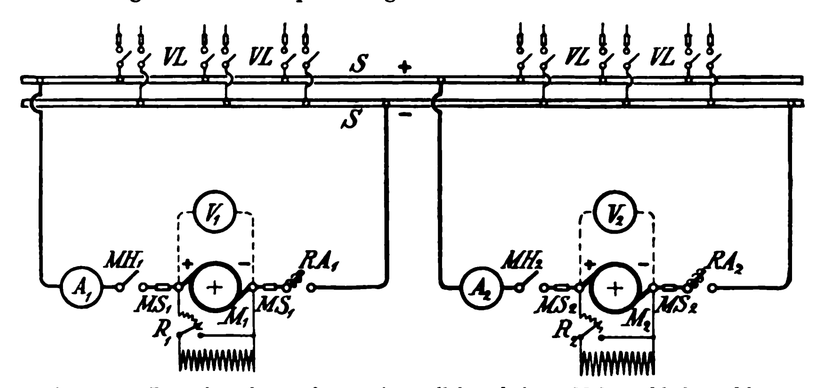


Fig. 383. Zentralenschema für zwei parallelgeschaltete Nebenschlußmaschinen.

durch das Vorhandensein mehrerer Maschinen eine Reserve geschaffen. Eine große Maschine bei kleiner Leistungsabgabe laufen zu lassen hat den Nachteil, daß dadurch wesentlich höhere Leistungsverluste auftreten, als wenn die geringe Leistung durch einen kleineren Maschinensatz abgegeben wird. Arbeitet eine der Maschinen allein, so gilt dafür alles, was unter § 108 angegeben ist. Auch ist über das Verwendungsgebiet für die weitaus meisten Fälle dasselbe zu sagen.

Das Schema einer Anlage für zwei Maschinen zeigt Fig. 383, in der dieselben Bezeichnungen gelten, wie in Fig. 382, nur deutet der Index die Zugehörigkeit zu der einen oder anderen Maschine an, und an Stelle eines Maschinenhebels ist auf jeder Seite ein Rückstromausschalter RA getreten.

A. Übergang vom Betrieb der ersten Maschine zum Parallelbetrieb.

M_2 wird, während MH_2 und RA_2 offen sind, angenähert auf die gleiche Spannung der belasteten M_1 gebracht. Sind beide Span-

nungen genau gleich, so wird durch Einlegen von MH_2 und RA_2 nichts geändert; M_2 läuft stromlos mit. Ist M_2 im Leerlauf etwas niedriger eingestellt, als M_1, so tritt Strom von M_1 aus über zu M_2 und läßt M_2 als Motor laufen. Der von M_1 zu M_2 übergehende Rückstrom tritt mit den im vorigen Kapitel beschriebenen Erscheinungen auf, wird also groß und betriebsgefährlich und beansprucht in seinem Entstehen eine Unterbrechung durch einen Rückstromausschalter. Wird M_2 auf etwas höhere Spannung gebracht, als M_1, so nimmt M_2 vom ersten Einschalten ab sofort an der Stromlieferung an das Netz teil und entzieht dadurch bereits der Maschine M_1 einen Teil der Belastung. Beide Stromquellen sind, bezogen auf den Stromkreis des Netzes, nebeneinandergeschaltet.

Bedeutet

i_1 den Strom im Zweige von M_1,
i_2 „ „ „ „ „ M_2,
E_1 die EMK „ „ „ M_1,
E_2 „ „ „ „ „ M_2,
w_1 den Widerst. „ „ „ M_1,
w_2 „ „ „ „ „ M_2,
E die Spannung zwischen den Verzweigungspunkten,

so gilt:

$$E_1 - i_1 w_1 = E_2 - i_2 w_2 = E,$$

woraus sich das Verhältnis der Ströme ergibt:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{E_1 - E}{E_2 - E} \cdot \frac{w_2}{w_1};$$

$E_1 - E$ ist der Spannungsverlust in dem Zweige von M_1, $E_2 - E$ derjenige im Kreise von M_2. Der Ausdruck besagt zunächst, daß bei beliebigen Werten w_1 und w_2 durch Einstellung von E_1 und E_2 ein beliebiges Verhältnis der Ströme erreicht werden kann, wobei zu beachten ist, daß E angenähert konstant zu halten ist, und daß $i_1 + i_2 = I$ den vom Netz beanspruchten Strom bedeutet. Der Ausdruck des Verhältnisses der Ströme besagt weiterhin, daß bei geringen Widerständen w_1 und w_2, die auch geringe Spannungsverluste zur Folge haben, eine geringe Änderung von E_1 gegen E_2 eine erhebliche Änderung des Verhältnisses der Ströme herbeiführt.

Die Änderungen von E_1 und E_2 können durch die Nebenschlußregler in feinen Stufen vorgenommen werden, daher müssen auch die Strommesser A_1 und A_2 von den Nebenschlußreglern aus bequem beobachtbar sein.

Gewöhnlich kommt man damit aus, daß die belastete M_1 vor dem Parallelschalten zunächst auf den zulässigen Geringstwert, die unbelastete M_2 auf den zulässigen Höchstwert der Netzspannung gebracht wird. Beim Einlegen von MH_2 und RA_2 stellt sich dann die von beiden Maschinen gemeinsam herrührende Netzspannung auf

einen Zwischenwert ein. Durch Einstellen von R_2 zu geringerem Widerstande hin läßt sich erreichen, daß die Netzspannung ihren zulässigen Höchstwert wiederbekommt, wodurch zugleich der Stromanteil von M_2 vermehrt, von M_1 verringert wird. Eine weitere Verschiebung des Stromes von M_1 aus zu M_2 hin erfolgt nun durch Zurückstellung von R_1, d. h. durch Vermehrung seines Widerstandes. Das kann geschehen, wenn die gewünschte Stromverteilung vorher noch nicht vorhanden sein sollte, bis die Netzspannung ihren zulässigen Geringstwert erreicht hat. Eine weitere Verringerung des Widerstandes von R_2 und darauffolgende Vermehrung des Widerstandes von R_1 unter Einhaltung der Grenzen der Netzspannung gestattet also durch abwechselndes Arbeiten an den Reglerkurbeln eine beliebige Vergrößerung des Stromanteiles von M_1, bis der gewünschte Zustand erreicht ist, ohne daß das Netz darunter zu leiden hat. Bei jeder Anzahl parallel arbeitender Maschinen ist das Verfahren wechselseitig anwendbar.

B. Übergang vom Parallelbetrieb zum Betrieb der zweiten Maschine allein.

Nach den unter A angegebenen Grundsätzen wird M_1 weiter entlastet, bis ihr Stromanteil nahezu gleich Null ist. Dann erfolgt das Herausspringen von RA_1, dem durch ein Herausziehen von MH_1 auch vorgegriffen werden kann, sowie das weitere Vorgehen nach § 108 C.

C. Leitender Grundgedanke bei allen Zentralenbetrieben.

Bei allen Schaltungsänderungen während des Betriebes muß die Netzspannung in den zulässigen Grenzen bleiben; zuzuschaltende Stromquellen werden zuvor auf Netzspannung gebracht, abzuschaltende Teile werden zuvor nahezu stromlos gemacht.

D. Zweck der Spannungsmesser-Umschalter.

Unter Anwendung eines Spannungsmesser-Umschalters, der für den Fall zweier Maschinen nach dem Schema Fig. 384 angeschlossen wird, tritt der Vorteil auf, daß die einzustellenden Spannungen an einem Instrument abgelesen werden können; verschiedene Instrumente können Verschiedenheiten aufweisen, die bei Parallelschaltung der Teile zu Störungen Anlaß geben würden.

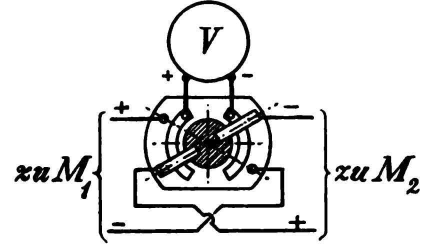


Fig. 384. Spannungsmesser-Umschalter.

§ 110. Anlage mit einer Nebenschlußmaschine und Akkumulatorenbatterie mit Einfachzellenschalter.

Ein Beispiel des Schaltungsschemas zeigt Fig. 385. Einzelheiten zum Verständnis dieser Einrichtung sind in § 107 B enthalten. Die Buchstaben der Fig. 385, soweit sie in diesem Kapitel neu sind, haben folgende Deutung:

MA = Maschinenstrommesser,
B = Akkumulatorenbatterie,
BH = Batteriehebel,
BA = Batteriestrommesser,
BS = Batteriesicherung (zweipolig),
Z = Zellenschalter,
U = Umschalter.

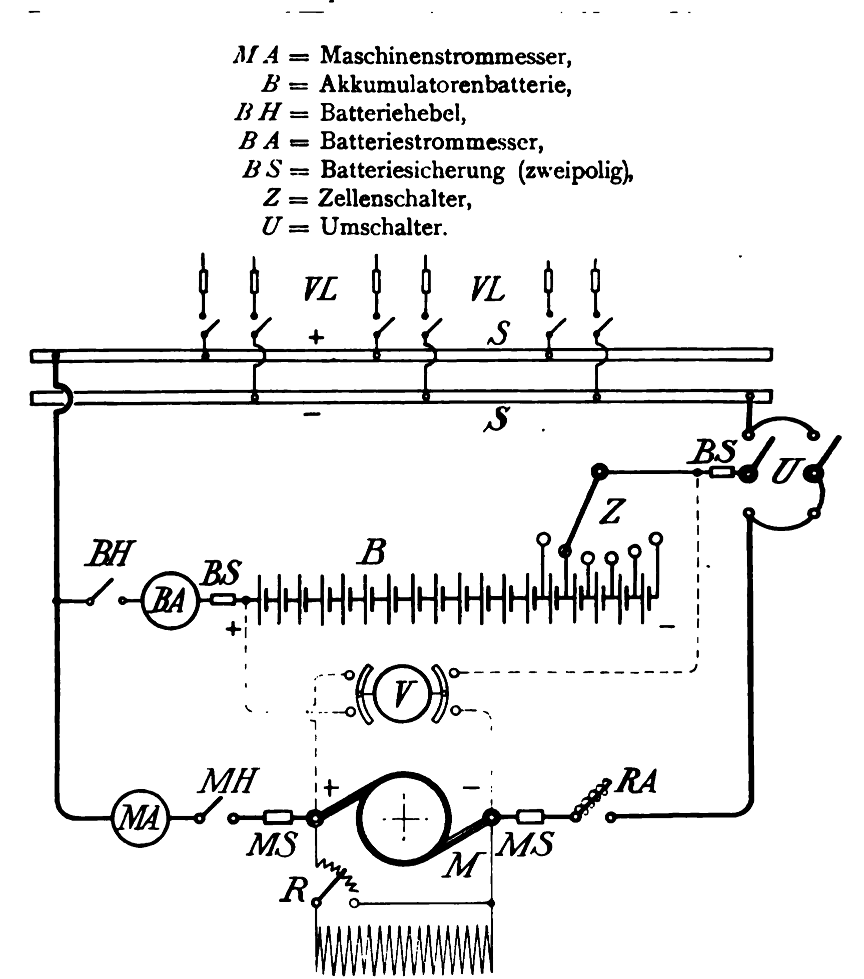


Fig. 385. Zentralenschema mit Akkumulatoren und Einfachzellenschalter.

Bei Anwendung anderer Instrumente, als nach dem Westonsystem, kommt im Batteriekreise ein Stromrichtungszeiger hinzu.

Der Umschalter ist als ein Doppelhebel zu denken, dessen Kontakte nach den angedeuteten Linien miteinander verbunden sind. Die Stellung des Hebels nach oben bedeutet den Anschluß des Netzes, nach unten den Anschluß der Batterie für die Ladung. Das Schema gestattet also die Ladung nur bei abgeschaltetem Netz, bei Lichtanlagen am Tage, wenn keine Lampen gebraucht werden.

Die Anlage läßt folgende Betriebsmöglichkeiten zu:

1. Ladung der Akkumulatoren ohne Stromabgabe an das Netz.
2. Die Akkumulatoren allein arbeiten auf das Netz.

3. Die Maschine allein arbeitet auf das Netz.
4. Maschine und Akkumulatoren in Parallelschaltung arbeiten auf das Netz.

Im Betriebsfalle 1 (Ladung) wird nach § 107 B verfahren, wozu folgende Einzelheiten nochmals herausgegriffen sein mögen:

Während alle Hebel usw. offen sind, erfolgt das Ansetzen von M, das Messen der Spannung von B, während Z auf größter Zellenzahl steht, und das Einstellen der Spannung von M auf einen etwas höheren Wert. Hieraus wird U nach unten gelegt, BH, MH und RA geschlossen, worauf bereits ein geringer Ladestrom fließt, während V in beiden Stellungen seines Umschalters nun ohne Rücksicht auf Leitungsverluste die gleiche Spannung anzeigt. Die Regelung der Ladestromstärke geschieht durch R. Falls genügende Gasung der letzten Zelle eingetreten ist, wird der Ladestrom, der an BA und MA gleiche Werte besitzt, ein wenig mit Hilfe von R verringert. Dann stellt man Z auf den nächsten Kontakt und regelt den Ladestrom von neuem ein. Das wird fortgesetzt, bis zum Schluß die Stammbatterie genügend gast. Die Unterbrechung des Ladestromes erfolgt an einem beliebigen Hebel des Kreises, nachdem der Ladestrom zuvor durch R genügend geschwächt worden ist, so daß eine Beschädigung der Ausschalterkontakte vermieden wird.

Der Betriebsfall 2 (die Akkumulatoren allein arbeiten auf das Netz) ist vorzubereiten, indem die Batterie durch Z auf Netzspannung eingestellt wird, während MH, RA, BH und U offen sind. Durch Einlegen von U nach oben und Schließen von BH wird das Netz angeschaltet. Das weitere Verfahren ist in § 107 B genau behandelt. Im Verlaufe der Entladung muß MH und RA offen bleiben.

Für Betriebsfall 3 (Maschine allein arbeitet auf das Netz) ist § 108 gültig bei offenem BH.

Der Betriebsfall 4 (Maschine und Akkumulatoren in Parallelschaltung arbeiten auf das Netz) ist durch § 109 vorbereitet, indem an Stelle einer zweiten Maschine die Batterie tritt, und indem an der Batterie als Regelungsmittel der Zellenschalter verwendet wird. Sämtliche Übergänge von dem einen Betriebsfall zum anderen sind nach § 109 A, B und C entsprechend vorzunehmen, jedoch ist zu beachten, daß der Zellenschalter im allgemeinen ein gröberes Regelungsmittel ist, als der Nebenschlußregler.

§ 111. Anlage mit einer Nebenschlußmaschine und Akkumulatorenbatterie mit Doppelzellenschalter.

Es gilt das Schema Fig. 386 mit den neuen Bezeichnungen:

Z_E = Zellenschalter-Entladekurbel,
Z_L = Zellenschalter-Ladekurbel,
ES = Entladesicherung,
LS = Ladesicherung,
EH = Entladehebel.

Der Umschalter U ist mit seinem Drehpunkt an einen Maschinenpol gelegt. Der Zellenschalter besitzt in Wirklichkeit **eine** Kontaktbahn und **ein** System von Zellenschalterleitungen. Im Schema sind diese Teile nur der Deutlichkeit wegen doppelt gezeichnet. Beide Kurbeln Z_E und Z_L sind konzentrisch drehbar, voneinander isoliert

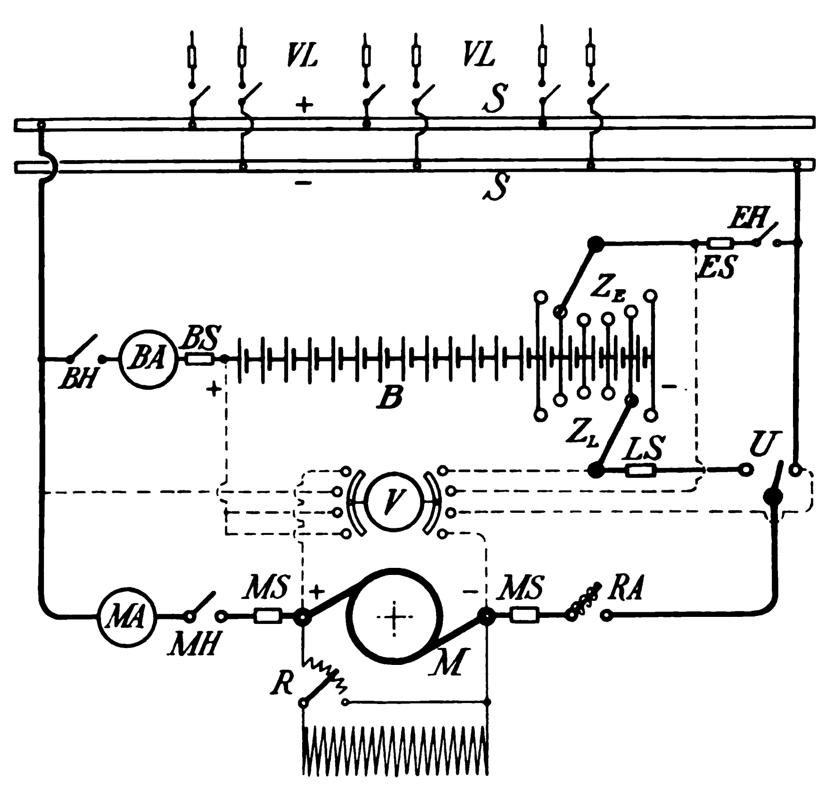


Fig. 386. Zentralenschema mit Akkumulatoren und Doppelzellenschalter.

und so angeordnet, daß beide Kurbeln auch auf demselben Kontakt stehen können. Beim Betrieb steht Z_E meistens auf geringerer Zellenzahl, als Z_L.

Der Doppelzellenschalter hat gegen die Schaltung von § 110 den Vorzug, daß bei Anwendung einer großen Anzahl von Schaltzellen ein schwacher Strom während der Ladung an das Netz abgegeben werden kann. Zu dem Zweck sind so viel Schaltzellen erforderlich, daß die Netzspannung aus Elementen von je 2,7 Volt hergestellt werden kann. Damit die Anlage nicht zu sehr verteuert wird, findet man die über das normale Maß hinaus gehenden Zellenschalterleitungen häufig mit geringerem Querschnitt ausgeführt, da ein Ladestrom nicht hindurch-

zugehen braucht. Es kann sich während der Ladung nur um Abgabe eines sehr geringen Stromes an das Netz handeln, da der in das Netz geschickte Strom den Schaltzellen von Z_E aus und der Stammbatterie bei der Ladung entzogen wird. Der Ladestrom der Schaltzellen von Z_L bis Z_E, der größere Wert, wird an *MA*, derjenige der Stammbatterie usw., der kleinere Wert, an *BA* abgelesen. Die Differenz beider Ströme wird an das Netz abgegeben. Da die Schaltzellen gewöhnlich für dieselbe Stromstärke, wie die Stammbatterie hergestellt werden, und da *MA* nicht mehr, als die zulässige Ladestromstärke führen darf, zieht sich bei Abgabe eines Netzstromes die Ladung der Stammbatterie entsprechend länger hinaus.

§ 112. Anlage mit Haupt- und Zusatzmaschine, sowie Doppelzellenschalter.

Der vorliegenden Betrachtung sei das Schema Fig. 387 zugrunde gelegt. Es bedeutet darin außer früheren Bezeichnungen:

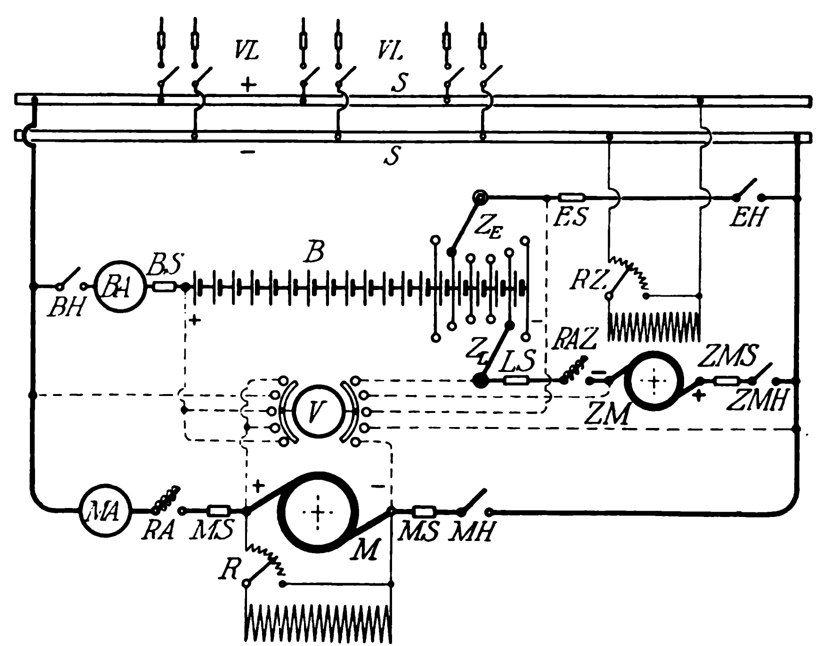


Fig. 387. Zentralenschema mit Zusatzmaschine und Doppelzellenschalter.

ZM die Zusatzmaschine,
ZMS die Zusatzmaschinensicherung,
ZMH den „ „ hebel,
RZ den „ „ regler,
RAZ den „ „ rückstromausschalter.

Die Schemata von § 111 und das vorliegende gestatten beide, in allen Betriebsvorgängen ununterbrochen angenähert konstante Netzspannung zu halten, jedoch ist letzterem für größere Anlagen mit erheblichem Tagesbetrieb der Vorzug zu geben.

Dieses Schema vermeidet die Notwendigkeit der Spannungsüberhöhung der Maschine zur Ladung der Akkumulatoren und die mit der Überhöhung auftretenden Nachteile. Er vermeidet außerdem den Nachteil des vorigen Schemas, daß nur ein beschränkter Strom während der Ladung an das Netz abgegeben werden kann. Die Besserung wird dadurch erreicht, daß zwei Maschinen, die Hauptmaschine M und die Zusatzmaschine ZM für die Ladung hintereinandergeschaltet werden. Die Hauptmaschine (durch Nebenschluß erregt) erzeugt Netzspannung, die Zusatzmaschine (im vorliegenden Beispiel von den Schienen aus erregt) eine von Null bis zu halber Netzspannung veränderliche Anzahl Volt. Der eine Pol des Netzes liegt an dem Verbindungsstück zwischen M und ZM. Dadurch kann während der Ladung der Akkumulatoren zugleich ein unmittelbar der Hauptmaschine entnommener Strom in das Netz geschickt werden, für dessen Stärke die ganze Differenz zwischen der höchsten Stromstärke von M und der Ladestromstärke zur Verfügung steht. Die Zusatzmaschine ist für die Stärke des höchstens Ladestromes bemessen.

Bei allen Schaltungsvorgängen verfährt man nach den unter § 109 C gegebenen Grundsätzen, wobei für die Ladung der Akkumulatoren an drei Stellen, R, RZ und Z_L eingestellt werden muß. Für alle übrigen Vorgänge sind nur ein oder zwei regelnde Teile zu bedienen, nämlich:

R, wenn M allein auf das Netz arbeitet,
Z_E, wenn B „ „ „ „ „
R und Z_E, wenn M und B parallel arbeiten.

Ein Strommesser ist an obigem Schema an der Zusatzmaschine entbehrlich, da während der Ladung EH offen ist, und der Strom von ZM an BA abgelesen werden kann. Der Rückstromausschalter der Zusatzmaschine ist erforderlich, da in einem Übergangsfalle ZMH, RAZ und EH zugleich eingelegt sein können. Die Erregung von ZM von den Schienen aus hat die Möglichkeit einer genaueren Regelung von ZM bei geringen Spannungen zur Folge, als im Falle der Selbsterregung.

Die Zusatzmaschine wird in manchen Fällen von einer Kraftmaschine aus mit der Hauptdynamo zusammen angetrieben. Bei der Geringfügigkeit ihrer Leistung gegen M findet sich jedoch auch häufig ein elektrischer Antrieb, indem ein von den Schienen aus angeschlossener Motor unmittelbar mit der Zusatzmaschine gekuppelt ist.

§ 113. Dreileiteranlagen (vgl. § 39, B).

Die nach Fig. 388 geschaltete Anlage besitzt zwei gleiche hintereinandergeschaltete Nebenschlußmaschinen, die meistens auf einer

Welle mit der Antriebsmaschine sitzen oder mit ihr unmittelbar gekuppelt sind. Das Verbindungsstück zwischen dem Pluspol der einen und dem Minuspol der anderen Maschine enthält den Angriffspunkt des geerdeten Mittelleiters. Beide Maschinen können unabhängig voneinander in ihrer Spannung geregelt werden. Die Anlage gestattet daher bis zur Belastungsgrenze der Maschinen beliebige Verschiedenheit in der Belastung beider Netzhälften. Das Schema bildet eine Verdopplung des unter § 108 gegebenen Schemas im Sinne der Hinter-

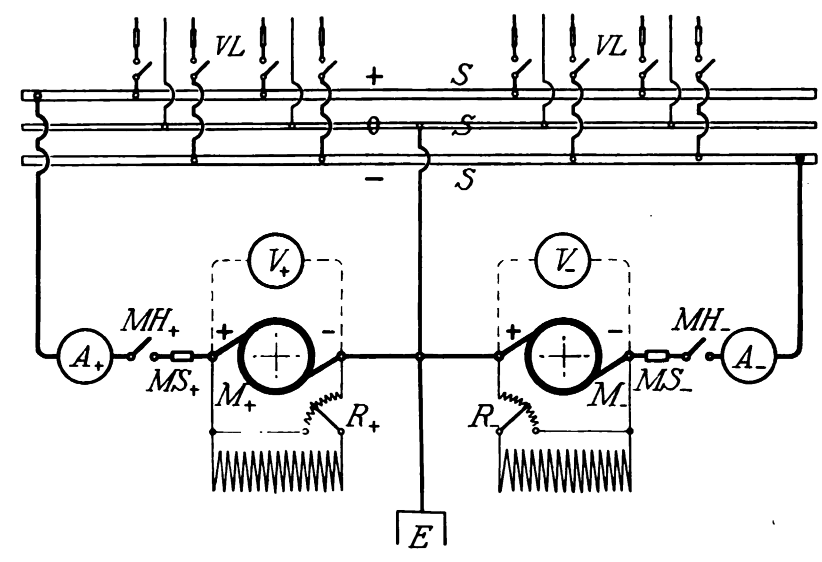


Fig. 388. Dreileiteranlage ohne Akkumulatoren.

einanderschaltung. Für den Betrieb kommt daher auch alles, was in § 108 gesagt ist, in Betracht.

Es kann für eine Dreileiteranlage unter Verwendung voneinander unabhängiger Seiten jedes der von § 108 bis § 112 gegebenen Schemata im Sinne der Fig. 388 verdoppelt werden, nur tritt dabei der Nachteil auf, daß zwei Maschinen von bestimmter Leistung teurer sind, als eine gewöhnliche Maschine derselben Stromstärke und der doppelten Spannung, also auch der doppelten Leistung. Dieser Umstand hat dazu geführt, daß vielfach nur eine Maschine verwendet wird, während die Spannungsteilung durch die Akkumulatoren erfolgt. Ein Beispiel eines Schemas für diesen Fall gibt Fig. 389. Es enthält zugleich eine Zusatzmaschine und zwei Doppelzellenschalter mit erhöhter Kontaktzahl.* Die Zusatzmaschine lädt einen veränderlichen Teil der Schaltzellen in einem besonderen Kreise unabhängig von dem Strom der übrigen

* Netzspannung: 2,7 = Zellenzahl der Stammbatterie.

Batterie bis zu den Entladekurbeln. Nur, falls der Strom in beiden Kreisen gleich ist, kann von einer reinen Hintereinanderschaltung die Rede sein, wobei dann das Verbindungsstück zwischen den beiden Entladekurbeln stromlos ist als Brücke zwischen zwei Punkten gleichen Potentiales, wenn nicht gerade das Netz in diesem Stück den Strom veranlaßt; das Verbindungsstück führt ohne Berücksichtigung eines

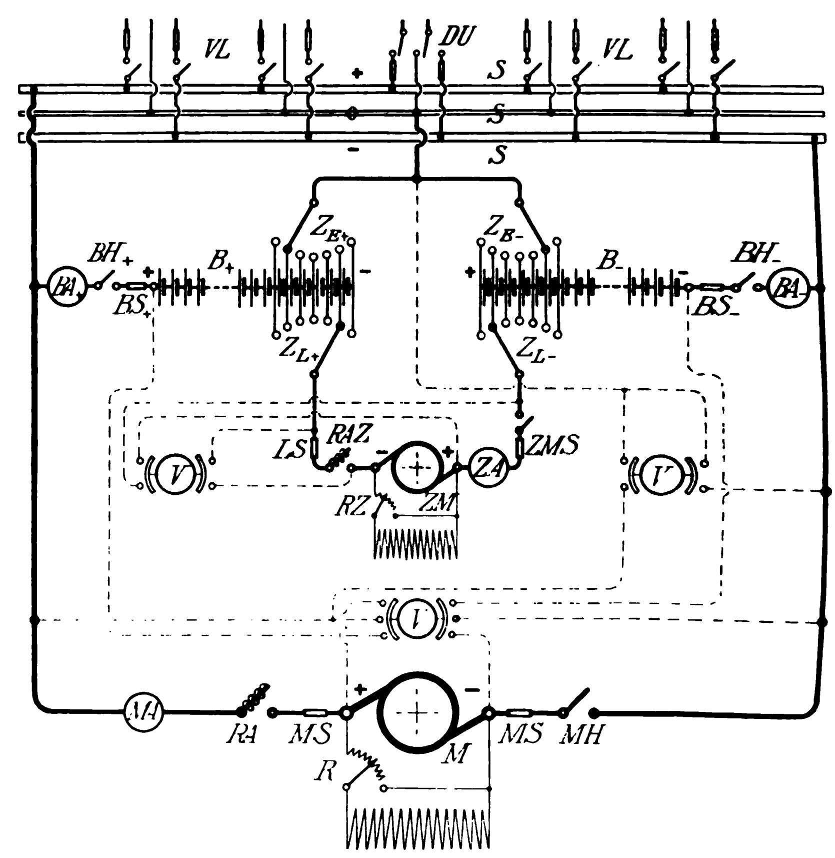


Fig. 389. Dreileiteranlage mit Spannungsteilung durch Akkumulatoren.

Netzstromes die Differenz der Ladestromstärken des Haupt- und Zusatzkreises. Der Zusatzkreis bedarf daher auch eines Strommessers *ZA*.

Schemata nach Art der Fig. 389 leiden an dem Nachteil, daß bei ungleicher Belastung der Netzhälften die beiden Batteriehälften in verschiedenen Entladezustand geraten, während die Ladung in Hintereinanderschaltung beider Hälften erfolgen muß. Das hat zur Folge, daß eine weniger entladene Hälfte bei der Ladung unnötig lange gasen muß, bis die stärker beanspruchte Seite fertig geladen ist. Man ist

daher bestrebt, die Belastung beider Netzhälften gleichmäßig zu gestalten, was dann, wenn die Belastung dem Zufall überlassen ist, nicht immer durchgeführt werden kann. Ein Ausgleich der Belastung kann in manchen Fällen, falls es sich um den eigenen Lichtbedarf handelt usw., durch einen Dreileiterumschalter (*D U* in Fig. 389) erfolgen, der einen bestimmten oder einen veränderlichen Teil der Belastung entweder zwischen + und 0 oder zwischen 0 und — legt. Der Übergang während des Betriebes ist nur mit einer Stromunterbrechung in dem betreffenden Zweige möglich. Am Tage kann der Ausgleich an passenden Netzanschlüssen häufig für die nächste Zukunft geregelt werden.

An Stelle der Verwendung von Akkumulatoren für die Spannungsteilung kann die Verwendung von Ausgleichsmotoren (Siemens & Halske, Siemens-Schuckertwerke) treten. Das Verständnis der Wirkungsweise bedarf einiger Vorbemerkungen:

Ist der Mittelleiter nicht bis zur Stromquelle zurückgeführt, so erhalten beide Hälften des Dreileitersystemes, wenn nichts weiteres dazukommt, bei ungleicher Belastung verschiedene Spannungen. Der Einfachheit halber sei nur mit Glühlampen gleichen Widerstandes gerechnet. Hat die eine Seite z_1 Lampen, die andere z_2 Lampen, und ist der Widerstand einer Lampe W, so sind die Widerstände beider Seiten des Netzes:

$$w_1 = \frac{W}{z_1} \quad \text{und} \quad w_2 = \frac{W}{z_2};$$

unter Fortfall des Mittelleiters würden beide Hälften in reiner Hintereinanderschaltung den gleichen Strom führen, der mit I bezeichnet sein möge, und es wird die Spannung

$$\text{auf der einen Seite } E_1 = I \cdot w_1 = I \cdot \frac{W}{z_1},$$

$$\text{„ „ anderen „ } E_2 = I \cdot w_2 = I \cdot \frac{W}{z_2};$$

das Verhältnis der Spannungen beträgt demnach:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I \cdot W \cdot z_2}{I \cdot W \cdot z_1} = \frac{z_2}{z_1},$$

oder in Worten: Die Spannungen beider Seiten verhalten sich umgekehrt wie die Zahlen der eingeschalteten Lampen. Da die Einschaltung der Lampen dem Zufall überlassen bleibt, sind Ausgleichsmittel notwendig, wenngleich auch durch Sorgfalt in der Verteilung der Stromverbraucher eine Annäherung in der Belastung beider Seiten für jede Tages- und Nachtzeit erzielt werden kann.

Als Ausgleichsmaschinen sind zwei gleiche Maschinen zu denken, die wie Nebenschlußmotoren für halbe Außenleiterspannung in ihren Wicklungen bemessen sind. Die Anker beider, in Fig. 390 mit M_1

und M_2 bezeichneter Maschinen sind mechanisch unmittelbar miteinander gekuppelt. Der Anker der ersten Maschine liege zwischen + und 0, derjenige der zweiten zwischen 0 und —; die Magnetwicklungen sind gegen die Anker versetzt, so daß die Erregerspulen der ersten Maschine zwischen 0 und —, diejenigen der zweiten zwischen + und 0 liegen.

Die Maschinengruppe nimmt bei Spannungsgleichheit beider Seiten den gleichen schwachen Ankerstrom in beiden Ankern auf, der zum Leerlauf erforderlich ist. Der Strom in den Magnetwicklungen ist auch gering, so daß der Stromverbrauch der Maschinengruppe im ganzen mäßig ausfällt.

Bei ungleicher Belastung läuft der Anker auf der Seite mit höherer Spannung als Motoranker und ist durch den zugleich geschwächten

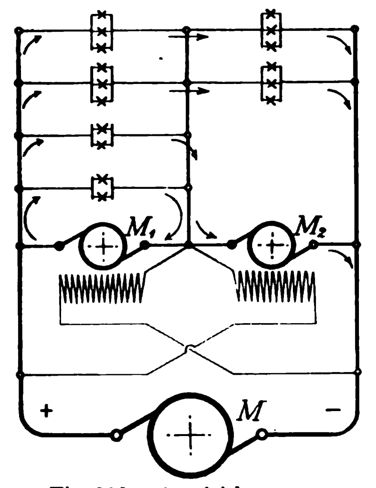



Fig. 390. Ausgleichsmotoren (Siemens & Halske).

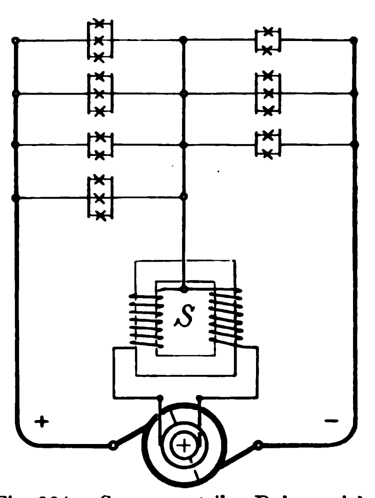


Fig. 391. Spannungsteiler Dobrowolsky (A. E.-G.)

Magnetstrom zu einer größeren Stromaufnahme gezwungen, als bei stets gleich bleibendem Kraftflusse. Er treibt den Anker, der auf der Seite der niedrigeren Spannung liegt, der als Generatoranker wirkt, der die Spannung seiner Seite erhöht und zugleich Strom in seine Netzhälfte schickt. Der gesteigerte Kraftfluß dieser Maschine trägt wesentlich zu der Spannungserhöhung bei. Durch die Maschinengruppe wird also Leistung derjenigen Seite entnommen, an der sie überflüssig sein würde, und derjenigen Seite zugeschickt, die sie braucht.

Die ausgleichende Wirkung dieser Maschinengruppe ist sehr günstig, wenn die magnetischen Kreise gering gesättigt sind. Die Maschinen beanspruchen eine Anlaßvorrichtung, die im Schema nicht mit angegeben ist.

Eine weitere Ausgleichsvorrichtung (Dobrowolsky, Allgemeine

Elektrizitäts-Gesellschaft) kann erst nach Erledigung des Gebietes der Wechselströme verstanden werden. Sie beruht auf folgenden hier vorwegzunehmenden Tatsachen:

1. Eine Spule (*S* in Fig. 391) aus einer Anzahl dicker Kupferwindungen, die auf einem aus geteiltem Eisen bestehenden, in sich geschlossenen Kerne liegen, hat für Gleichstrom einen geringen, für Wechselstrom einen großen Widerstand.

2. Jeder Gleichstromanker kann durch ein einfaches Mittel unter Anwendung zweier Schleifringe (vgl. Figg. 425 und 426) auch als Wechselstromanker verwendet werden. In Fig. 391 sind zu beiden Seiten die Gleichstromklemmen, oben die beiden Wechselstromklemmen angegeben.

Die Dreileitermaschine besitzt beim Spannungsteiler der A. E.-G. die unter 2 gekennzeichneten Schleifringe. Die Wechselstromklemmen werden mit den Enden der nach 1 eingerichteten, aus zwei Wicklungshälften bestehenden Spule verbunden. Von dem Verbindungsstück beider Wicklungshälften zweigt der Mittelleiter ab. Tritt in einem mit dieser Einrichtung versehenen Dreileitersystem auf beiden Seiten ungleiche Belastung auf, so findet der Gleichstrom vom Nullleiter durch die Spule einen Weg zum Anker zurück, während der Wechselstrom in der Spule nur mit geringem Leistungsverlust auftritt. Der Mittelleiter bezieht einen Teil der bei solchen Spulen hin und her pendelnden Arbeit, von der im Wechselstromgebiet die Rede sein wird.

14. Kapitel.

Der Wechselstrom.

§ 114. Begriff von der Entstehung eines Wechselstromes.

Vorbemerkungen.

Bewegt sich ein Draht durch den Kraftfluß eines Magnetgestelles, z. B. nach Art der Fig. 392, so befindet er sich bei seinem Umlauf abwechselnd unter einem Süd- und einem Nordpol. Es entsteht daher bei dem Umlauf zwischen den Enden des Drahtes eine fortwährend wechselnde Spannung.

Bringt man an den Enden des Drahtes metallische Ringe an, die isoliert und konzentrisch zur Welle sitzen, so kann man diesen Ringen durch Schleiffedern einen Wechselstrom entnehmen (Fig. 393). Zwei Drähte, die gleichzeitig unter benachbarten ungleichnamigen Magnetpolen liegen, können durch Verbindungen an den Stirnseiten eines Eisenkörpers, auf dem sie untergebracht sind, hintereinandergeschaltet werden. Eine mehrmalige Wiederholung dieser Hintereinanderschaltung

zwischen denselben Magnetpolen führt zu einer Spule. Sind die Enden eines solchen Spulensystemes, das beispielsweise durch Fig. 394 abgewickelt schematisch angedeutet ist, mit Schleifringen verbunden, so entsteht begrifflich eine Wechselstrommaschine.

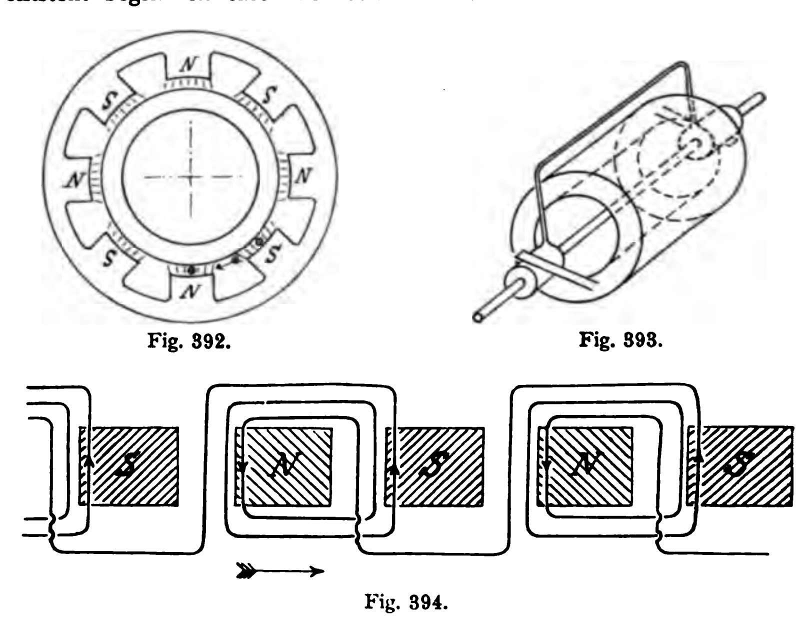


Fig. 392. Fig. 393.

Fig. 394.

A. Die Kurve der Spannung.

Die Kraftlinien, die aus einem Polschuh austreten, durchsetzen nicht nur den Luftraum, der unmittelbar unter ihnen liegt, sondern sie breiten sich auch nach der Seite aus und werden immer dichter, je mehr die betrachtete Stelle dem Pole näher rückt. In der Mitte zwischen zwei Polen treten keine Kraftlinien in das Eisen ein, daher wird an dieser Stelle bei dem Umlauf eines Drahtes auch keine Spannung erzeugt. In dem Maße, wie die Kraftlinien bei dem Heranrücken eines Drahtes an den Polschuh dichter werden, steigt auch die Spannung zwischen den Enden des Drahtes, wenn seine Geschwindigkeit konstant ist. Unterhalb des Polschuhes bleibt die Spannung, wenn der Luftraum überall radial gleich groß ist, ungefähr konstant. Bei dem Verlassen des Poles schließlich fällt die Spannung entsprechend der Verminderung der Kraftliniendichte, wird in der Mitte gleich Null und steigt von da ab bis zum nächsten Pol in entgegengesetzter Richtung.

Der Verlauf der Spannung läßt sich durch ein Schaubild darstellen. In Fig. 395 sind zunächst die Pole, an denen der Draht vorbeiwandert, in gerader Linie gezeichnet. Unter den Polen ist von einer wagerechten Achse aus jedesmal die Spannung, die zu der darüber liegenden Stelle gehört, der Größe nach senkrecht aufgetragen.

Liegt vorn der positive Pol des Drahtes, so ist die Spannung nach oben, liegt vorn der negative, so ist die Spannung nach unten gezeichnet. Denjenigen Teil des Vorganges, der zwischen zwei Durchgangspunkten dieser Linie durch die Abszissenachse liegt, nennt man

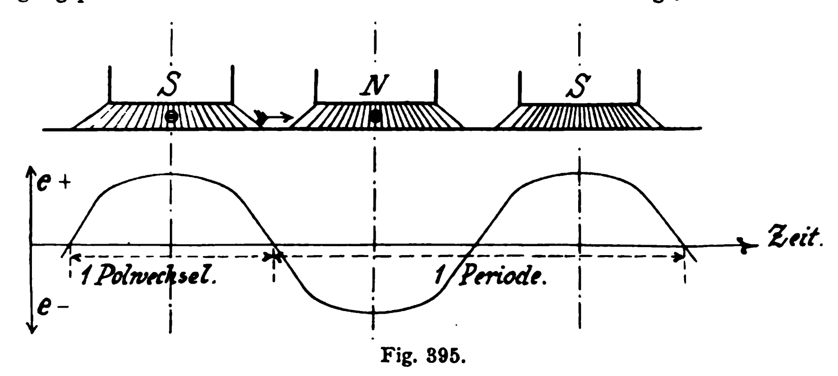


Fig. 395.

einen Polwechsel, den Teil von dem einen Durchgangspunkt bis zum übernächsten eine Periode der Spannung. Die Zahl der Perioden in der Sekunde heißt die Frequenz (der Puls). Normal sind 100 Wechsel in der Sekunde, d. h. die Dauer eines Polwechsels beträgt 1 : 100, diejenige einer Periode 1 : 50 Sekunde.

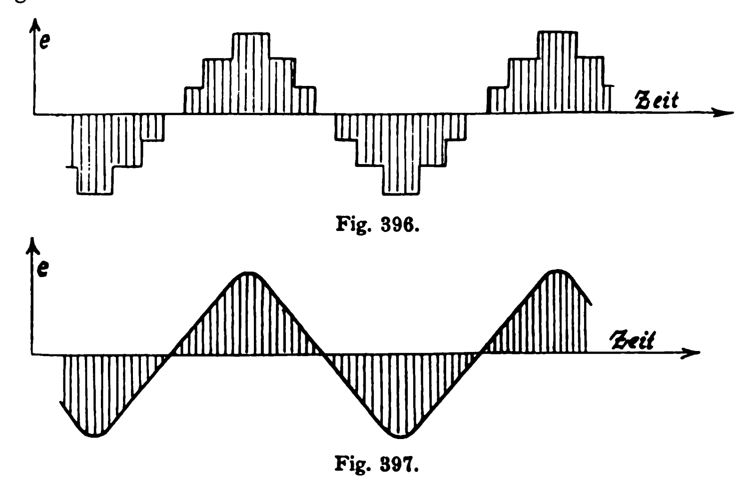


Fig. 396.

Fig. 397.

Durch die Form der Polschuhe kann dem Kraftlinienstrom eine bestimmte Verteilung gegeben werden; dadurch ist es möglich, auch eine bestimmte Form der Spannungskurve bei einer Maschine zu erreichen, wenn die Spulen nicht unterteilt sind.

Ein weiteres Mittel zum Erreichen einer bestimmten Spannungskurve ist durch Unterteilung der Spulen gegeben.

Die Ankerdrähte liegen im Ankereisen gewöhnlich (vgl. Fig. 429) in Nuten eingebettet. In Fig. 394 sei jede Schleife das Sinnbild für einen Teil der Spule, der zwischen denselben Nuten gewickelt ist. Jede Spule besteht dann aus drei solchen Teilen. Die Nordpole und die Südpole sind in Fig. 394 so schraffiert gezeichnet, daß die Kreuzungspunkte zwischen den Drähten und den schraffierten Linien bei einer Bewegung des Drahtes in der Richtung wandern, wie der induzierte Strom verlaufen würde.

Stehen die Spulen in der Stellung der Fig. 394, so bewegt sich bei jeder Spule nur ein Draht innerhalb des Feldes. In einem späteren Augenblick, als die Figur angibt, würden sich überall zwei Drähte innerhalb des Feldes bewegen, mithin steigt die Spannung auf den doppelten Wert. In einem folgenden Augenblick steigt die Spannung abermals, da nun drei Drähte mitwirken. Das Entsprechende ist bei dem Verlassen der Magnetpole wahrzunehmen. Die Kurve tritt in Wirklichkeit nicht stufenweise nach Art von Fig. 396 auf, vielmehr gleichen sich die Stufen zum größten Teile aus, da der Übergang der Drähte in das Feld nicht plötzlich erfolgt, so daß als Kurve zum Schema der Fig. 394 etwa die Fig. 397 angesehen werden kann.

Für die rechnerische Erledigung empfiehlt sich eine mathematisch einfach zugängliche Kurvenform, als welche die Sinuskurve zu betrachten ist. Zugleich führt die Erzeugung von Sinuskurven auch praktisch zum günstigsten Falle.

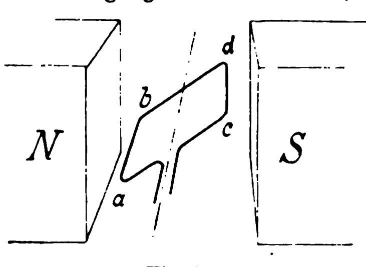


Fig. 398.

Eine in Fig. 398 gezeichnete Schleife laufe zwischen zwei Magnetpolen N und S um. Die Feldstärke sei an allen Stellen des für die Schleife in Frage kommenden Raumes konstant und gleich gerichtet. Ebenfalls sei die Umlaufsgeschwindigkeit konstant. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß sich die Spannungen, die in den beiden Drähten ab und cd induziert werden, für die vorn liegenden Abnahmestellen in jeder Lage addieren, und daß die in beiden Drähten erzeugten Spannungen für einen und denselben Augenblick in jeder Lage der Schleife gleich groß sind.

Um das Gesetz für das Ansteigen und Fallen der Spannung zu verfolgen genügt es einen einzigen der beiden Drähte zu betrachten. Zu diesem Zweck sei die Bahn des Drahtes im Felde mit Fig. 399 dargestellt. Wir denken uns den Umlauf an dem Radius 1, dann beträgt der ganze Umfang 2π, ein Viertel des Umfanges $\pi/2$ usw. nach den Bezeichnungen der Figur. Eine bestimmte Stelle des Verlaufes wird durch den Winkel α des in Fig. 399 umlaufenden Drahtes ausgedrückt. Eine Periode entspricht einem Winkel von 360^0, ein Wechsel einem Winkel von 180^0.

Bewegt sich der Draht gerade in der Symmetrieebene zwischen beiden Polflächen, in der Figur bei Stellung 0 oder π, so streift er an den Kraftlinien entlang, ohne sie zu schneiden, daher wird an diesem Punkt beim Umlauf keine Spannung erzeugt.

Bewegt sich dagegen der Draht bei einem von 90° verschiedenen Winkel α von der Symmetrieebene aus gemessen, so werden über einen bestimmten Teil des Umfanges AB weniger Kraftlinien geschnitten, als etwa bei der Stellung $^1/_2\,\pi$ über einen gleichen Teil des Umfanges $A'B'$. Zeichnet man von den Endpunkten des betrachteten Teiles jedesmal eine Linie parallel und eine zweite Linie normal zu den Kraftlinien, so wird dadurch etwa bei dem Winkel α ein Dreieck ABC ausgeschnitten, welches dem

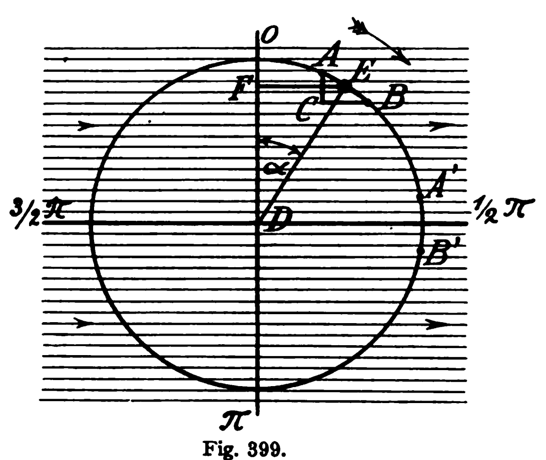


Fig. 399.

Dreieck EDF ähnlich ist. Es tritt daher in dem kleinen Dreieck ebenfalls der Winkel α auf, und die Linie AC, welche jedesmal der Zahl der geschnittenen Kraftlinien entspricht, ist proportional zum Sinus des Winkels α. Es läßt sich daher für beliebige Winkel α die Größe der induzierten Spannung aufstellen durch die Gleichung

$$e_\alpha = c \cdot \sin \alpha, \tag{1}$$

wobei c eine Konstante bedeutet. Wie groß die Konstante ist, ergibt sich aus der Betrachtung der Stelle, wo

$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$

ist. Hier werden die Kraftlinien unter 90° geschnitten, und hier ist die Spannung daher am größten. Der Sinus von $\pi/2$ ist gleich $+1$, daher ergibt sich die Größe c als diejenige positive Spannung, die im Höchstfalle erzeugt werden kann, und die mit $e_\wedge$ (sprich e-Scheitel) als der Scheitelwert bezeichnet werden möge; in denjenigen Quadranten, wo der Sinus negativ ist, wird der Augenblickswert der Spannung e nach obiger Gleichung ebenfalls negativ. Für alle folgenden Betrachtungen laufe die Schleife der Fig. 398 im Sinne des Uhrzeigers um, und von der in Fig. 399 angedeuteten Nullstellung aus sind die Quadranten im Sinne der Uhrzeigerdrehung zu zählen.

Aus obiger Gleichung wird die Augenblicksspannung bei dem Winkel α

$$e_\alpha = e_m \cdot \sin \alpha. \qquad (2)$$

Hat ein Strom ν Perioden in der Sekunde, so erhält man aus obiger Gleichung die Größe der Spannung zur Zeit t (ausgedrückt in Sekunden)

$$e_t = e_m \sin 2 \nu \pi t. \qquad (3)$$

$2 \nu \pi$ ist die Umfangsgeschwindigkeit des in Fig. 399 umlaufenden Drahtes am Radius 1 (die Winkelgeschwindigkeit).

Trägt man den abgewickelten Umfang des Kreises von Fig. 399 auf einer wagerechten Achse auf, dann kann man bei jedem Winkel

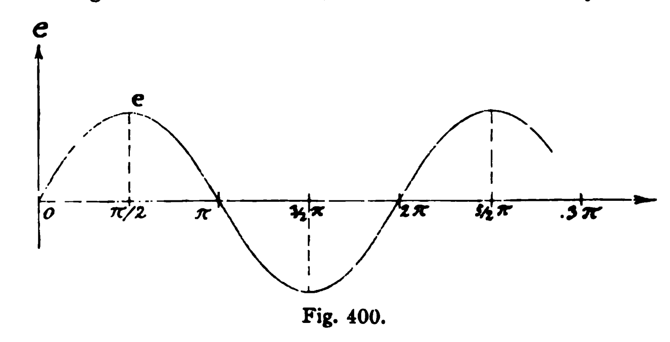


Fig. 400.

aus Fig. 399 die zugehörige Linie AC bzw. eine zu ihr proportionale Linie senkrecht antragen, und es entsteht somit ein Schaubild des Verlaufes der Spannung nach Fig. 400. Die dabei zutage tretende Wellenlinie drückt einen sinusfömigen Verlauf der Spannung aus.

B. Die Kurve des Stromes bei Phasengleichheit.

Der einfachste Fall liegt vor, wenn der Strom in jedem Augenblick eine Stärke besitzt, die der in demselben Augenblick auftretenden

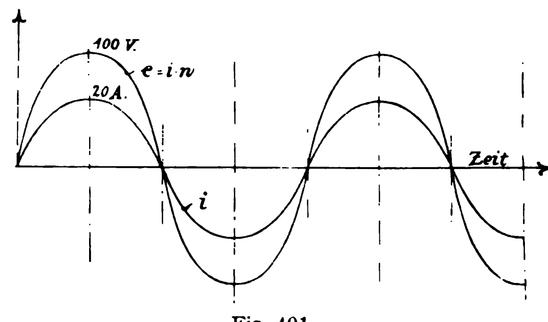


Fig. 401.

Spannung proportional ist, mit anderen Worten, wenn für jeden Augenblick das Ohmsche Gesetz in der einfachsten Form gilt:

$$i_a = \frac{e_a}{w}; \tag{4}$$

dabei bedeutet:

i_a die augenblickliche Stromstärke (Ampere) an derjenigen Stelle, wo die umlaufend gedachte Schleife unter dem Winkel α steht;

e_a die oben erklärte augenblickliche Spannung (EMK) (Volt);

w den in Ohm ausgedrückten konstanten Widerstand des Kreises.

Das Auftreten von Spannung und Strom unter obigen Voraussetzungen ist durch Fig. 401 für einen speziellen Fall ausgedrückt ($w = 5$ Ohm).

Der Strom zur Zeit t hat bei Gültigkeit der Fig. 399 die Stärke:

$$i_t = \frac{e_n}{w} \cdot \sin 2\nu\pi t. \tag{5}$$

§ 115. Effektivwerte.

Nur solche Wirkungen sind bei Wechselstrom von Bedeutung, die quadratischen Charakter haben, d. h. deren Größe in jedem Augenblick

$$X = f \cdot i^2 \tag{6}$$

gesetzt werden kann, wobei f einen positiven, konstanten oder veränderlichen Faktor und i den Augenblickswert des Stromes bedeutet. Daher können auch nur solche Wirkungen zu Meßzwecken herangezogen werden.

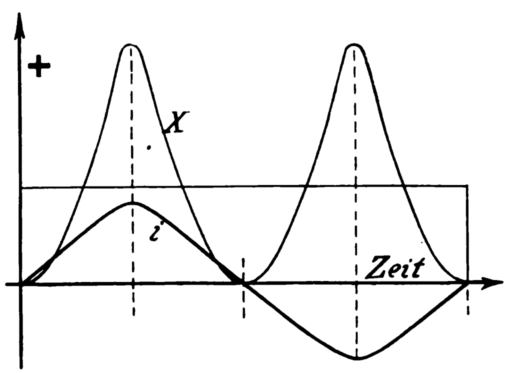


Fig. 402.

Befolgt daher ein Strom eine beliebige in Fig. 402 ausgedrückte Kurve (i), und wird dieser Strom durch einen Wechselstrommesser geschickt, so übt er auf den beweglichen Teil Wirkungen aus, die der ebenfalls in Fig. 402 eingezeichneten Kurve (X) entsprechen.

Diese Kurve der Wirkungen liegt nur auf der positiven Seite auf Grund des Satzes, daß das Quadrat einer negativen Zahl ebenfalls positiv ist. Für sinusförmigen Verlauf des Stromes sind die Ordinaten der X-Kurve denjenigen einer $\sin^2$-Kurve proportional.

Die Messung eines Wechselstromes sei zunächst vorgenommen gedacht mit einem Meßgerät, das eine Wirkung X benutzt, bei der der Faktor f eine konstante Zahl bildet. Genau stimmt das nur für die dynamische Wirkung, also eine magnetische Wirkung ohne Gegenwart

von Eisen. Eine unter dem Einfluß der dynamischen Impluse stehende Masse nimmt durch die Impulse eine Ruhelage an. Der bewegliche Teil stellt sich in diesem Falle bei Wechselstrom (i_w) so ein, wie er sich bei Gleichstrom (i_g) einstellen würde, wenn die unter einer Geraden $f \cdot i_g^2$ liegende Fläche ebenso groß ist, wie die unter der Kurve $f \cdot i_w^2$ liegende Fläche. Die in Fig. 402 eingezeichnete Ausgleichslinie ist das Sinnbild dafür. Die oben von der Kurvenfläche abgeschnittenen Teile sind ebenso groß, wie die unter der Ausgleichslinie liegenden dazukommenden Teile.

Werden die kleinsten in Rechnung gezogenen Zeitteilchen gleicher Größe t genannt, während T die Dauer einer Periode bezeichnet, so drückt sich das, was ein dynamischer Strommesser bei Wechselstrom anzeigt, aus:

$$I = \sqrt[2]{\frac{[i_1^2 t_1 + i_2^2 t_2 + \ldots]_{\text{Per.}}}{T}} = \sqrt[2]{\frac{\Sigma [i^2 t]_{\text{Per.}}}{T}}. \quad (7)$$

Dieser Wert heißt die Effektivstromstärke. In Gegenüberstellung der Wirkungen von Gleichstrom und Wechselstrom würde für gleiche Angaben des Meßgerätes gelten:

$$X = f \cdot i_g^2 = f \cdot \frac{\Sigma [i_w^2 t]_{\text{Per.}}}{T}. \quad (8)$$

Der angezeigte Strom ist die Quadratwurzel aus dem zeitlichen, über eine Periode (oder eine ganze Zahl von Perioden) gerechneten Mittel der Quadrate der Augenblicksstromstärken.

Für Sinusstrom liegt die Ausgleichlinie in der Mitte zwischen der Achse und dem Höchstwerte von X, so daß sich für Sinusstrom der Effektivwert

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_n \quad \text{(Wiss. 3)} \quad (9)$$

ergibt. Für andere Kurvenformen tritt zu der rechten Seite obiger Gleichung für praktische Rechnungen ein von 1 verschiedener Faktor.

Kommt unter Benutzung magnetischer Wirkungen Eisen hinzu, so wird in obiger Betrachtung f veränderlich, und es wird dadurch nicht mehr genau der effektive Wert der Stromstärke angezeigt. Es ist aber bei geringer Sättigung des Eisens die Abweichung vom Effektivwert unbedeutend, und es können daher Weicheiseninstrumente für die Ansprüche der Praxis angewendet werden.

Die Hitzdrahtmeßgeräte würden nur unter den Voraussetzungen Effektivwerte anzeigen, daß ihr Widerstand über eine Periode genau konstant bleibt, und daß die vom Hitzdraht in einer Periode aufgenommene Wärmemenge einer gleichmäßigen Abströmung unterliegt. Streng genommen ist das nicht erfüllt, denn der Hitzdraht macht (je dünner er ist, um so mehr) kleine Temperaturschwankungen während eines Wechsels mit und gibt in Augenblicken, wo er heißer ist, mehr Wärme ab, als in Augenblicken weniger heißen Zustandes, so daß er

im Mittel kälter ist, als er sein müßte. Die Abweichungen vom Effektivwert sind jedoch ebenfalls so gering, daß die Hitzdrahtmeßgeräte praktisch als richtig angesehen werden können.

Daher folgt: Es sind dynamische, mit Gleichstrom geeichte (mit Skala versehene) Meßgeräte denkbar*, die bei Wechselstrom Effektivwerte anzeigen. Weicheisen- und Hitzdrahtmeßgeräte zeigen Abweichungen von dem Effektivwert, die aber klein gehalten werden können.

Da nach Gleichung (4) das Ohmsche Gesetz für die Augenblickswerte in jedem Falle Gültigkeit besitzt, kann für die Augenblicksspannung

$$e_a = i_a \cdot w \tag{10}$$

und deren Quadrat

$$e_a^2 = i_a^2 \cdot w^2 \tag{11}$$

gesetzt werden. Man gelangt so auch zu einem Effektivwert der Spannung, indem in Ausdruck (7) der Faktor w^2 zu jedem einzelnen Gliede der Summe kommt, der aus der Klammer herausgezogen werden kann, so daß der Effektivwert der Spannung

$$E = \sqrt{\frac{w^2 [i_1^2 t + i_2^2 t + \ldots]_{\text{Per.}}}{T}} = w \sqrt{\frac{\Sigma [i^2 t]_{\text{Per.}}}{T}} = w I \tag{12}$$

wird.

Zur Unterstützung des Verständnisses dieser Entwicklung dient, daß in den meisten technischen Fällen die Spannungsmessung unter Benutzung der Stromwirkungen erfolgt.

Unter dem Effektivwert der Spannung versteht man die Quadratwurzel aus dem zeitlichen, über eine Periode (oder eine ganze Zahl von Perioden) gerechneten Mittel der Quadrate der Augenblicksspannungen.

Es folgt aus obiger Betrachtung, daß das Ohmsche Gesetz unter der Annahme, daß zwischen Strom- und Spannungskurve keine zeitliche Verschiebung vorhanden ist (bei Phasengleichheit), ohne weiteres, wie für Gleichstrom, auch für die Effektivwerte des Wechselstromes gilt; d. h. die mit einem (genau genommen dynamischen) Spannungsmesser gemessene Effektivspannung ist durch die mit einem (genau genommen dynamischen) Strommesser gemessene effektive Stromstärke zu dividieren, damit die Ohmzahl des betreffenden Leiterteiles erhalten wird, welche dieselbe ist, wie sie für Gleichstrom gemessen wird.

Für Sinusform gilt entsprechend Gleichung (9) auch für die Spannung

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e_m . \tag{13}$$

Die Schaulinie Fig. 401 zeigt, daß an derjenigen Stelle, wo e positiv ist, auch i positiv, wo e negativ, auch i negativ ist; daher muß

* Vgl. weiter die Bemerkungen unter § 116 C und D.

das Produkt der Augenblickswerte der Leistung $e \cdot i$ an allen Stellen des Verlaufes positiv sein, was durch Fig. 408 unter Annahme einer beliebigen, etwa durch Fig. 401 ausgedrückten Stromkurve dargestellt ist.

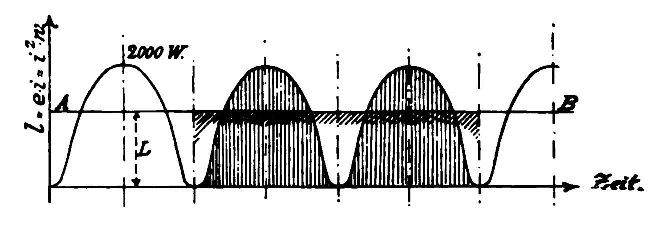


Fig. 408.

Unter dem Winkel α ist die Augenblicksleistung

$$l_\alpha = e_\alpha \cdot i_\alpha, \tag{14}$$

wofür auf Grund von Gleichung (10) auch zu setzen ist:

$$l_\alpha = i_\alpha^2 \cdot w; \tag{15}$$

daher stellt sich die in einer Periode auftretende Arbeit dar zu

$$A_{\text{Per.}} = w \cdot [i_1^2 t + i_2^2 t + \ldots]_{\text{Per.}} = w\, \Sigma [i^2 t]_{\text{Per.}}; \tag{16}$$

diese Arbeit, auf eine Folge gleicher Perioden gleichmäßig verteilt, ergibt die effektive Leistung:

$$L = w \frac{\Sigma [i^2 t]_{\text{Per.}}}{T} = w \cdot I^2 \tag{17}$$

oder auf Grund von Gleichung (12):

$$L = E \cdot I. \tag{18}$$

Die effektive Leistung L (Watt) ist das zeitliche Mittel der über eine Periode (oder eine ganze Zahl von Perioden) gerechneten, einzelnen Augenblicksleistungen. Sie wird unter der Voraussetzung, daß zwischen Strom- und Spannungskurve keine Verschiebung vorhanden ist, gleich dem Produkt der effektiven Spannung E (Volt) und der effektiven Stromstärke I (Ampere).

Die effektive Leistung erhält man durch Messung unter Anwendung eines Leistungsmessers, da die Impulse, welche der bewegliche Teil erhält, den unter der Leistungslinie (Fig. 408) bis zur Achse liegenden Flächenteilen proportional sind.

Die bisherigen Betrachtungen zeigen also, daß bei Wechselstrom mit Effektivwerten (gemessenen Werten) unter der Voraussetzung, daß zwischen Strom- und Spannungskurve keine Verschiebung eintritt, alles in gleicher Weise gilt, wie bei Gleichstrom. Obige Voraussetzung ist praktisch erfüllt, wenn ein Wechselstrom durch gewöhnliche Widerstände ohne Selbstinduktion (Glühlampen, zweidrähtig gewickelte oder auf- und abgeführte Widerstände) fließt.

Gleichung (13) hat besondere praktische Bedeutung, da die Isolation dem Scheitelwert der Spannung, nicht etwa dem Effektivwert, genügen muß; außerdem ist die physiologische Wirkung eines Wechselstromes bestimmter Effektivspannung größer, als sie unter gleicher Ablesung am Spannungsmesser bei Gleichstrom auftreten würde. Beide Erscheinungen sind um so empfindlicher, je spitzer die Strom- bzw. Spannungskurve ist.

Beispiel: Ein Spannungsmesser zeigt bei sinusförmigem Wechselstrom eine Spannung $E = 220$ Volt an. Wie groß ist die augenblickliche Spannung in ihrem Scheitelwerte?

Der Scheitelwert der Spannung beträgt:

$$e_n = E \cdot \sqrt{2} = 220 \cdot 1{,}415 = 311 \text{ Volt.}$$

§ 116. Wechselstromgesetze bei Phasenverschiebung.

A. Das Auftreten von Selbstinduktion.

Nach den Angaben über Selbstinduktion (§ 67, 11. Versuch und § 70 B, Rechnungen) setzt ein Stromleiter durch das Aufkommen seines Kraftliniensystems einem entstehenden Strome eine Spannung entgegen, während bei einem in Abnahme befindlichen Strome durch das abnehmende Kraftliniensystem eine Spannung auftritt, die einen Strom im gleichen Sinne nachzuschicken sucht. Am deutlichsten treten die Erscheinungen bei Spulen mit vielen Windungen auf. Ein Wechselstrom entsteht und verschwindet in fortwährender Aufeinanderfolge, und daraus wird verständlich, daß die Selbstinduktion bei Wechselstrom dauernd einen Einfluß ausübt.

Um Richtungsfragen in bezug auf weiteres festzulegen seien folgende Punkte angegeben:

1. Wir bezeichnen in einer Schleife einen Strom im Drehsinn des Uhrzeigers als positiv.
2. Eine einen Strom in positivem Sinne treibende EMK heißt positiv.
3. Dem fließenden Strome steht eine Widerstandsspannung $i \cdot w$ entgegen, die bei positivem Strome negativ, bei negativem Strome positiv ist; mit der Annahme, daß nur diese Widerstandsspannung auftritt, besitzt der Strom diejenige Stärke, bei der die algebraische Summe der EMK und der Widerstandsspannung des Kreises gleich Null ist, oder was dasselbe heißt, die EMK bildet einen Gegenwert zur Widerstandsspannung.
4. Ein positiver Strom erzeugt im Innern einer Schleife ein Feld, das vom Auge des Beschauers fort gerichtet ist (Ampèresche Schwimmregel). Diese Feldrichtung ist daher diejenige, die mit den bisherigen Festlegungen (Feldrichtung nach der auf einen Nordpol ausgeübten Kraftrichtung) als positiv bezeichnet werden muß.
5. Entsteht (oder vergrößert sich) in einer Stromschleife ein magnetisches Feld positiver Richtung, so wird dadurch (Regel der rechten Hand) eine gegen die Uhrzeigerrichtung drehende, also

negative Induktionsspannung erzeugt[Wiss. 2]. Verschwindendes positives und entstehendes negatives Feld erzeugt eine positive Induktionsspannung, während ein verschwindendes negatives Feld wieder eine negative Induktionsspannung zur Folge hat.

6. Die Selbstinduktionsspannung ist durch obige Festlegungen bei entstehendem positivem Strome, also bei entstehendem positivem Felde, negativ, bei verschwindendem positivem Strome positiv, bei entstehendem negativem Strome positiv, bei verschwindendem negativem Strome negativ; mit der Annahme, daß nur diese Selbstinduktionsspannung auftritt, stellt sich der Strom (vgl. unter 3) mit derjenigen Stärke ein, bei der die algebraische Summe der EMK und der Selbstinduktionsspannung des Kreises gleich Null ist, oder was dasselbe heißt, die EMK bildet einen Gegenwert zur Selbstinduktionsspannung.
7. Zur Berücksichtigung von Widerstand und Selbstinduktion zugleich sind die unter 3 und 6 angegebenen Spannungen zu addieren: daraus folgt, daß bei entstehendem Strome in beiden Richtungen die Widerstands- und Selbstinduktionsspannung hintereinander, bei verschwindendem Strome in beiden Richtungen gegeneinander geschaltet sind. Die den Strom durch den Kreis treibende EMK muß in jedem Augenblick einen Gegenwert zu der Summe der beiden Spannungen bilden.
8. Zur bildlichen Darstellung der Vorgänge kann man sowohl die direkt auftretenden Werte der Widerstandsspannung und Selbstinduktionsspannung, als auch ihre Gegenwerte zeichnen. Die Einzeichnung beider Werte führt zu wenig übersichtlichen Zeichnungen und zu stets wiederkehrenden Umständlichkeiten in der Betrachtung. Aus diesem Grunde ist in den folgenden Figuren nur e i n System der Werte gezeichnet und zwar dasjenige der Gegenwerte. Die Addition der zur Selbstinduktions- und Widerstandsspannung gehörigen Gegenwerte eines Leiters führt direkt zu den an einem angelegten Spannungsmesser auftretenden, meßbaren Spannungen.

Die Spannung der Selbstinduktion zunächst ohne Gegenwart von Eisen ist proportional der auf die Zeiteinheit gerechneten Änderung der Stromstärke; d. h. sie tritt bei Wechselstrom da am größten auf, wo die Neigung der Stromkurve gegen die Zeitachse am größten ist. Bei sinusförmigem Strome liegt diese Stelle da, wo die Stromkurve durch Null geht. Da, wo der Strom für einen Augenblick konstant bleibt, also am Scheitelwert, ist die Selbstinduktionsspannung gleich Null. Der Übergang der Selbstinduktionsspannung von Null zu ihrem Scheitelwert erfolgt bei sinusförmigem Strome auch in sinusförmigem Verlauf, so daß für diesen Fall das mit Fig. 404 gezeichnete Schaubild der Gegenwerte entsteht. Darin bedeutet i den Strom, e_w die zum

Strome proportionale und zur Überwindung des Widerstandes dienende und e_s die zur Überwindung der Selbstinduktion erforderliche Spannung.

Die Kurve der e_s ist gegen diejenige der e_w verschoben. Eine über das Schaubild von links nach rechts bewegt gedachte Senkrechte gibt durch die an ihr abgeschnittenen Strecken in zeitlicher Aufeinanderfolge die in dem betreffenden Augenblicke gleichzeitig auftretenden Werte von i, e_w und e_s an. So drückt das Schaubild aus, daß e_s um $^1/_4$ Periode früher den positiven Scheitelwert hat, als e_w und i, daß e_s um $^1/_4$ Periode früher durch Null geht, als die Werte e_w und i, usw.; eine solche zeitliche Verschiebung zwei periodischer Bewegungen oder Erscheinungen heißt eine Phasenverschiebung, und da die ganze Periode zu 360° gerechnet wird, beträgt in diesem Falle die Phasenverschiebung von e_s gegen e_w (bzw. i) einen Winkel von 90°, und zwar in dem Sinne, daß e_s gegen e_w und i vorauseilt oder, was dasselbe heißt, daß e_w und i gegen e_s zurückbleiben.

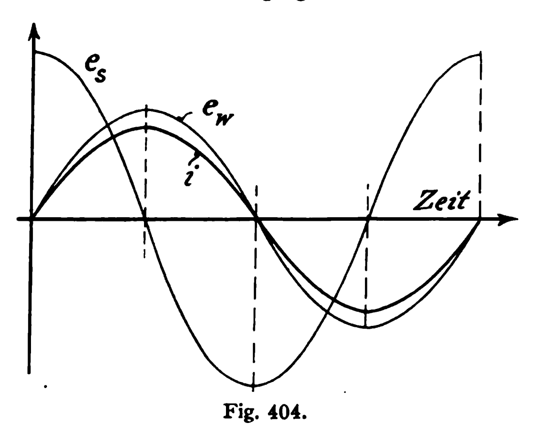


Fig. 404.

Die beiden Spannungen e_w und e_s können nur unter der Voraussetzung zustandekommen, daß die von außen angelegte Spannung in jedem Augenblick gleich der Summe $e_w + e_s$ ist, d. h. gleich ist einer Spannung, die in Fig. 405 unter Wiederholung der bisherigen Kurven als e_r (resultierende Spannung) angegeben ist. Diese Spannung e_r ist diejenige, die die Wechselstromquelle liefert, und die mit einem Spannungsmesser gemessen wird. Sie ist ebenfalls in der Phase gegen i verschoben, und zwar um einen Winkel, der zwischen 0° und 90° liegt. Ist die Selbstinduktionsspannung e_s gegen e_w sehr groß, so kommt der Winkel nahe an 90° heran. Ist e_w groß gegen e_s, so

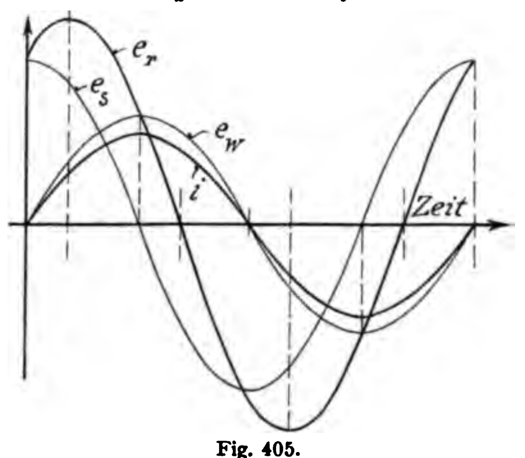


Fig. 405.

kommt der Winkel nahe an 0^0 heran. Die resultierende Spannung e_r ist in jedem Falle im Scheitelwert größer als e_w und größer als e_s in ihren Scheitelwerten. Der Verlauf von e_r ist bei sinusförmigem Strome ebenfalls sinusförmig. Auch gegen e_r bleiben e_w und i in der Phase zurück.

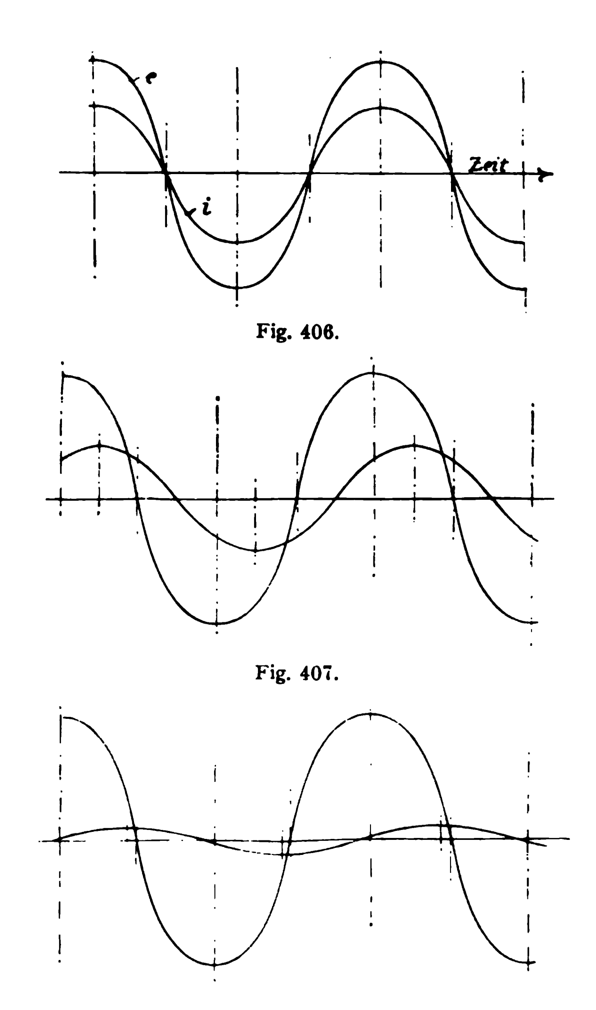


Fig. 406.

Fig. 407.

Fig. 408.

Die Erscheinung kann auch so ausgedrückt werden: **Legt man** eine Wechselstromquelle, welche die Spannung e_r liefert, an einen induktiven Widerstand, so wird ein periodisch veränderlicher Teil dieser Spannung zur Überwindung der Selbstinduktionsspannung und ein

anderer zur Überwindung des Widerstandes verwendet. Dadurch bleibt der Strom in seiner Phase hinter der Spannung, welche die Maschine liefert, zurück, und die Stromstärke wird durch das Vorhandensein der Selbstinduktion (da $e_{w_n} < e_{r_n}$) geringer, als sie bei gleichem Stromkreis auftreten würde, wenn die Selbstinduktion nicht vorhanden wäre. Die Selbstinduktion übt eine schwächende und eine (im Höchstfalle bis zu 90°) zurücktreibende Wirkung auf den Strom aus. Die Abbildungen Figg. 406 bis 408 verdeutlichen diesen Gedanken für einen Kreis von bestimmter treibender Spannung aus mit 0°, 45° und 80° Phasenverschiebung bei gleichem (wahrem) Widerstande.

Es ist bei gleichzeitiger Messung des Stromes und der Spannung an einem induktiven Widerstand zu beachten, daß beide Instrumente nun Effektivwerte zeigen, deren zugehörige Kurven zeitlich nicht mehr zusammenfallen. Der angezeigte Wert E des Spannungsmessers ist der Effektivwert der Werte e_r, der angezeigte Wert I des Strommessers der Effektivwert der Werte i. Auch ist nun der Quotient $E:I$ größer als der mit Gleichstrom gemessene Widerstand. Der Quotient der (gemessenen) Effektivspannung und des (gemessenen) Effektivstromes heißt der scheinbare Widerstand (der Richtungswiderstand oder die Impedanz), über dessen Größe im folgenden Untersuchungen angestellt werden. Die mit Gleichstrom gemessene Ohmzahl des induktiven Kreises heißt der Ohmsche Widerstand (wahrer Widerstand, Resistanz).

Soll die Größe dieser Erscheinungen verfolgt werden, so eignet sich die Polardarstellung besser. Sie entsteht dadurch, daß der Verlauf einer Periode als Winkel von 360° dargestellt wird, so daß der Winkel an einer bestimmten Stelle des Verlaufes zugleich ein Zeitmaß bildet (vgl. Fig. 399). Zu diesem Zweck wird der eine Schenkel des zeitlichen Winkels in der Nullstellung festgehalten gedacht (bei 0 in Fig. 399), während der bewegliche Schenkel dazu dient, durch vom Drehpunkt aus angetragene Strecken die Größe der zu diesem Augenblick gehörigen elektrischen Werte anzugeben. Der Drehpunkt heißt der Pol, die vom Pol aus aufgetragene Strecke der Fahrstrahl.

In dieser Darstellung wird ein sinusförmiger Verlauf durch zwei Kreise (wie bei dem Zeunerdiagramm) ausgedrückt, so daß sich als einfachster Fall etwa der Strom der Fig. 409 im Polarbild durch Fig. 410 darstellt. Der Kreis zur rechten Seite des Beschauers bedeutet den positiven, zur linken den negativen Teil des Verlaufes. In der elektrotechnischen Literatur ist es üblich zur Darstellung einer periodischen Größe nur den positiven Scheitelwert nach Richtung und Größe aufzutragen. Das wäre angewendet auf Fig. 410 der nach rechts liegende Durchmesser des i-Kreises, der mit $+ i_n$ bezeichnet sein möge. Denkt man sich nun einen umlaufenden Zeitpfeil (den beweglichen Schenkel des zeitlichen Winkels) dazu, so gibt die rechtwinklige Projektion des feststehenden $(+ i_n)$ Vektors auf diesen Zeitpfeil den zu dem betreffenden Augenblick gehörigen Wert nach Richtung und Größe, wobei das Vorzeichen negativ wird, wenn die Pro-

jektion jenseits des Drehpunktes fällt. Da es dem Anfänger nicht leicht wird, sich an diese Vorstellungsweise zu gewöhnen, sind die Projektionen in Fig. 410, 411 und einigen folgenden tatsächlich ausgeführt; es entstehen dadurch eben die Kreise.

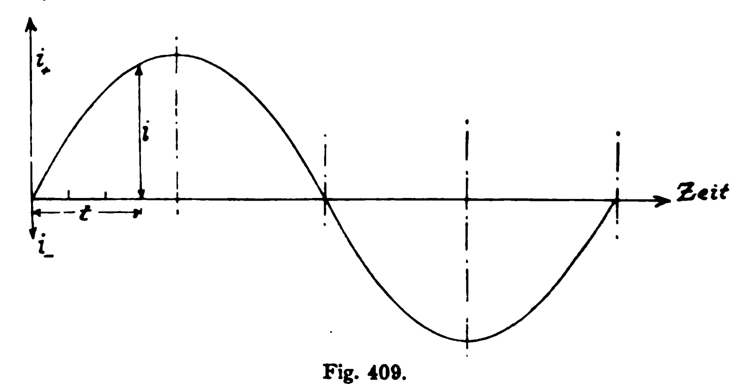


Fig. 409.

Hier sowohl, wie in den späteren Betrachtungen sind die Polarschaubilder so gezeichnet, daß der zeitliche Winkel im Sinne des Uhrzeigers gemessen wird, der Zeitstrahl also im Sinne der Uhrzeigerdrehung umläuft, und daß somit ein größerer, auch über 360 Grad hinaus zu messender Winkel einen späteren Zeitpunkt andeutet. Da wo mehrere Größen angetragen werden, sei zur Festlegung der Reihenfolge betont, daß der bewegliche Schenkel durch die an den festliegenden Kreisen abgeschnittenen Strecken die in dem betreffenden Augenblick gleichzeitig auftretenden Werte vom Pol aus gemessen angibt.

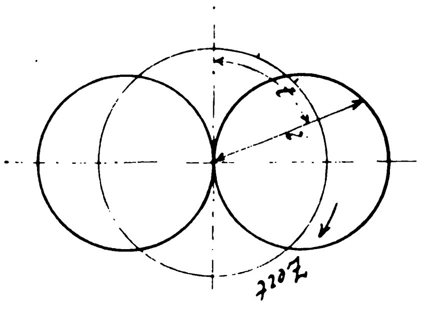


Fig. 410.

Aus dem Schaubild der Fig. 405 wird in der polaren Darstellung die Fig. 411.

Zu den Kreisen von i kommen die mit i in gleicher Phase liegenden Kreise von e_w und die um 90° verschobenen Kreise von e_s; die Summe $e_w + e_s$ stellt sich wiederum als Kreis (e_r) dar, dessen Durchmesser die Diagonale des aus den Durchmessern des e_w- und e_s-Kreises gebildeten Rechteckes ist. Es ist daher die Lage und die Größe des Scheitelwertes von e_r bestimmt; die Größe durch:

$$e_{r\frown} = \sqrt{e_{w\frown}^2 + e_{s\frown}^2} \quad \text{(Pythagoreischer Lehrsatz)} \qquad (19)$$

und die Lage durch den zwischen e_r und $e_{w\frown}$ bzw. $i_\frown$ liegenden Winkel φ, der der Bedingung unterliegt:

$$\sin \varphi = e_{s\wedge} : e_{r\wedge}, \tag{20}$$

$$\cos \varphi = e_{w\wedge} : e_{r\wedge}, \tag{21}$$

$$\operatorname{tang} \varphi = e_{s\wedge} : e_{w\wedge}. \tag{22}$$

Das, was hier für die Scheitelwerte gesagt ist, gilt auch für beliebige, zeitlich um 90^0 auseinander liegende Zwischenwerte von e_w und e_s; als resultierende Spannung ergibt sich an allen Stellen des vorliegenden Verlaufes die Gültigkeit der Gleichungen 19 bis 22 bei dem gleichen φ, d. h. der Winkel φ der Phasenverschiebung bleibt während des Verlaufes der Periode ein konstanter Wert.

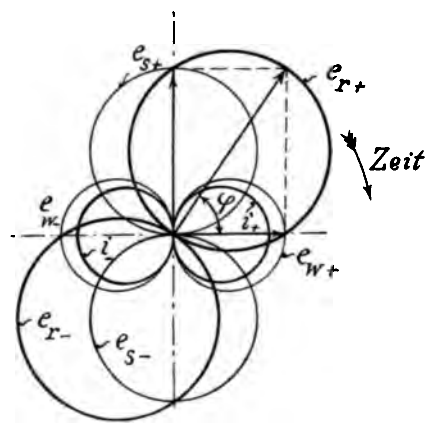


Fig. 411.

Die ganze Kreisdarstellung setzt sinusförmigen Verlauf des Stromes und Abwesenheit von Eisen voraus. Kommt Eisen mit geringer Sättigung hinzu, stimmen die Kreisdiagramme nicht mehr genau, jedoch wird auch in diesem Falle (meistens für die Praxis genügend genau) mit ihnen gerechnet. Im Falle der Anwesenheit von Eisen ist der Winkel φ genau genommen auch kein über die Periode konstant bleibender Wert, ist vielmehr je nach Abweichung der Kurven von der Sinusform größeren oder kleineren Verschiedenheiten unterworfen. Die Praxis rechnet dann mit einem mittleren φ.

Aus obigen Gleichungen folgt: Damit Größe und Lage von $e_{r\wedge}$ untersucht werden kann, muß zunächst $e_{w\wedge}$ und $e_{s\wedge}$ untersucht werden. Unter Anwendung von Gleichung 4 auf den Scheitelwert ist e_w bereits bekannt:

$$e_{w\wedge} = i_{\wedge} \cdot w; \tag{23}$$

so folgt nur noch die Notwendigkeit der Ermittlung von e_s.

Nach § 70 B kann die Selbstinduktionsspannung für einen bestimmten Leiter aus der Stromänderung unter Abwesenheit von Eisen berechnet werden; sei hier die Stromänderung in der Zeiteinheit mit j bezeichnet, so gilt:

$$e_s = S \cdot j; \text{ Wiss. 4)} \tag{24}$$

dabei bedeutet, falls e_s in Volt und j in Ampere auf die Sekunde gemessen werden, S den Selbstinduktionskoeffizienten des Leiters in Henry, der für geometrisch bestimmte Leiter berechenbar ist (vgl. Angaben von § 70, B, Ende).

Bei ν Perioden in der Sekunde ergibt sich der Scheitelwert der durch Gleichung 24 ausgedrückten Selbstinduktionsspannung zu

$$e_{s\wedge} = i_{\wedge} \cdot 2\,\nu\pi\,S. \text{ Wiss. 5)} \tag{25}$$

Die Proportionalität zum Strome folgt daraus, daß der Strom eine zu ihm proportionale (streng nur unter Abwesenheit von Eisen) Höchstzahl von Kraftlinien erzeugt; $2\nu\pi$ ist die zeitliche Winkelgeschwindigkeit des Stromes, die der räumlichen Winkelgeschwindigkeit des in Fig. 399 umlaufend gedachten Drahtes entspricht; zu ihr ist $e_{s\frown}$ ebenfalls proportional, da es sich auch hier um eine Induktionsspannung handelt, wo die Schnittgeschwindigkeit in Frage kommt.

Damit man den Scheitelwert von e_s erhält, ist also auch, wie für den Scheitelwert von e_w, der Scheitelwert des Stromes mit einem bestimmten Faktor zu multiplizieren. Bei e_w ist der Faktor w, bei e_s ist er $2\nu\pi S$; letzterer Faktor vertritt ebenfalls die Rolle eines Widerstandes und heißt die Reaktanz

$$w_s = 2\nu\pi S; \tag{26}$$

die Selbstinduktionsspannung heißt daher auch die Reaktanzspannung.

In Fig. 412 seien die in Fig. 411 enthaltenen positiven Scheitelwerte der Spannungen herausgezeichnet, wodurch Größe und Phase dieser Werte bestimmt ist.

In diesem Schaubild kann jede einzelne Spannung entsprechend Fig. 413 durch $i_\frown$ dividiert werden; es ändern sich dadurch die Fahrstrahlen nur der Größe nach, hingegen bleiben die Winkel infolge der Ähnlichkeit der Figuren erhalten. Der Größe $e_{s\frown}$ in Fig. 412 entspricht in Fig. 413 die Reaktanz $w_s = 2\nu\pi S$, der Größe $e_{w\frown}$ die wahre Ohmzahl w, und der Größe $e_{r\frown}$ die Resultierende aus $2\nu\pi S$ und w, die in dem Schaubild Fig. 413 mit R bezeichnet ist. Es gelten daher die aus den Gleichungen 19 bis 22 durch Einsetzung von Gleichungen 23 und 25 und mittels Division durch $i_\frown$ gewonnenen Ausdrücke:

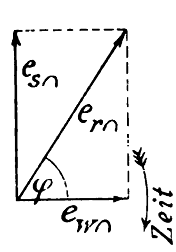


Fig. 412.

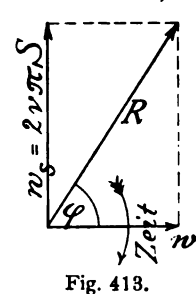


Fig. 413.

$$R = \sqrt{w^2 + (2\nu\pi S)^2}, \tag{27}$$

$$\sin\varphi = \frac{2\nu\pi S}{\sqrt{w^2 + (2\nu\pi S)^2}}, \tag{28}$$

$$\cos\varphi = \frac{w}{\sqrt{w^2 + (2\nu\pi S)^2}}, \tag{29}$$

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{2\nu\pi S}{w}. \tag{30}$$

Das Schaubild der Fig. 412 kann auch auf die Effektivwerte der Spannungen angewendet werden, wenn sich der Winkel φ während des Umlaufes nicht ändert; oder da bei vorhandenen Änderungen

mit einem mittleren φ gerechnet wird, bleibt der Übergang technisch zulässig. Nur ist zu beachten (vgl. S. 441), daß der Spannungsmesser die Effektivwerte aus e_r angibt, während die Angabe des Strommessers durch den Effektivwert des Stromes gebildet wird, der in Phase von e_w liegt. Aus Fig. 412 wird für Effektivwerte zugleich unter Einzeichnung des Effektivstromes I die Fig. 414, in der die Effektivspannung aus e_r mit E ohne Index bezeichnet ist. Die mit Strom- und Spannungsmesser meßbaren Werte sind in Fig. 414 stark hervorgehoben.

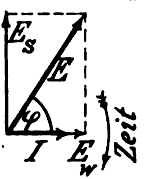


Fig. 414.

Das Verhältnis der an den Klemmen eines induktiven Widerstandes auftretenden Effektivspannung und des in diesem Widerstande fließenden Effektivstromes ist ebenfalls der in Gleichung 27 ausgedrückte Wert R, der sich dadurch als der auf S. 447 angegebene scheinbare Widerstand herausstellt:

$$R = \frac{E}{I}. \tag{31}$$

Mißt man an einer Spule zunächst mit Gleichstrom den Wert w, sodann mit Wechselstrom von bekannter Periodenzahl ν den scheinbaren Widerstand R, so kann nach Gleichungen 27 und 31 der Selbstinduktionskoeffizient S berechnet werden. Mit dem daraus erhaltenen S ist nunmehr auch der Phasenverschiebungswinkel, am einfachsten aus Gleichung 30 bestimmbar.

1. Beispiel. An einer Spule wird mit Gleichstrom ein Wert $E_g = 21$ Volt und ein zugleich auftretender Wert $I_g = 7$ Ampere gemessen. Bei einer sekundlichen Periodenzahl $\nu = 50$ werden mit Wechselstrom an derselben Spule die zusammengehörigen Effektivwerte $E = 60$ Volt und $I = 3$ Ampere gemessen.

a) Wie groß ist der Selbstinduktionskoeffizient?
b) Wie groß ist die Reaktanz?
c) Wie groß ist die Phasenverschiebung?

Zu a) Der wahre Widerstand beträgt:

$$w = E_g : I_g = 21 : 7 = 3 \text{ Ohm}.$$

Der scheinbare Widerstand beträgt:

$$R = E : I = 60 : 3 = 20 \text{ Ohm},$$

Der Selbstinduktionskoeffizient bestimmt sich aus

$$R = \sqrt{w^2 + (2\nu\pi S)^2} \quad \text{zu}$$

$$S = \frac{1}{2\nu\pi}\sqrt{R^2 - w^2} = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3{,}14}\sqrt{400 - 9} = 0{,}0629 \text{ Henry}.$$

Zu b) Die Reaktanz beträgt:

$$w_s = 2\nu\pi \cdot S = 2 \cdot 50 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}0629 = 19{,}77 \text{ Ohm}.$$

29*

Zu c) Die Phasenverschiebung bestimmt sich nach dem Ausdruck

$$\tan \varphi = \frac{2 \nu \pi S}{w} = \frac{19{,}77}{3} = 6{,}59 \quad \text{zu}$$

$$\varphi = 81^0 \; 22'.$$

Die Reaktanz ist, wie obige Betrachtungen lehren, für eine und dieselbe Spule (S konstant) mit der Periodenzahl veränderlich. Eine Vergrößerung der Periodenzahl (ν) in der Sekunde gibt eine zu ν proportionale Vergrößerung der Reaktanz. Das ist der Grund dafür, daß man die Periodenzahl nicht beliebig hoch wählen kann, und daß man in manchen Fällen (z. B. bei Arbeitsübertragungen) geringere Werte als $\nu = 50$ (entsprechend 100 Wechseln in der Sekunde) anwendet. Mit $\nu = 25$ wird für Arbeitsübertragungen Vieles gebessert, jedoch können Bogenlampen bei 25 Perioden in der Sekunde nicht mehr vorteilhaft betrieben werden, da das Flimmern des Lichtes stört. Kohleglühlampen mit nicht zu dünnen Fäden können bei $\nu = 25$ noch verwendet werden.

2. Beispiel. A. Wieviel Ampere führt die Spule des vorigen Beispieles bei der gleichen Effektivspannung aber

a) bei $\nu = 100$,
b) bei $\nu = 25$

Perioden in der Sekunde?

Zu a) Es beträgt:

Die Reaktanz:

$$w_s = 2 \nu \pi S = 2 \cdot 100 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}0629 = 39{,}54 \text{ Ohm.}$$

Der scheinbare Widerstand:

$$R = \sqrt{w^2 + w_s^2} = \sqrt{3^2 + 39{,}54^2} = 39{,}65 \text{ Ohm.}$$

Die Stromstärke:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{60}{39{,}65} = 1{,}515 \text{ Ampere.}$$

Zu b) Es beträgt:

Die Reaktanz:

$$w_s = 2 \nu \pi S = 2 \cdot 25 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}0629 = 9{,}885 \text{ Ohm.}$$

Der scheinbare Widerstand:

$$R = \sqrt{w^2 + w_s^2} = \sqrt{3^2 + 9{,}885^2} = 10{,}33 \text{ Ohm.}$$

Die Stromstärke:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{60}{10{,}33} = 5{,}81 \text{ Ampere.}$$

B. Wie groß ist die Phasenverschiebung an der Spule des vorigen Beispieles bei

a) $\nu = 100$ Per./Sek.,
b) $\nu = 25$ Per./Sek. ?

Zu a) Es beträgt:

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{w_s}{w} = \frac{39{,}54}{3} = 13{,}18 \quad \text{und} \quad \varphi = 85^0\ 40'.$$

Zu b) Es beträgt:

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{w_s}{w} = \frac{10{,}33}{3} = 3{,}44 \quad \text{und} \quad \varphi = 73^0\ 47'.$$

Zusammenstellung:

bei $\nu = 25$ Per./Sek. ist $I = 5{,}81$ Ampere und $\varphi = 73^0\ 47'$,
bei $\nu = 50$ Per./Sek. ist $I = 3$ Ampere und $\varphi = 81^0\ 22'$,
bei $\nu = 100$ Per./Sek. ist $I = 1{,}515$ Ampere und $\varphi = 85^0\ 40'$.

Die Leistung. Würde an einem Leiter die Reaktanz groß sein gegen den wahren Widerstand, so würde eine Phasenverschiebung von nahezu 90^0 herauskommen. Unter Annahme von genau 90^0 gilt:

In demjenigen Augenblick, wo i den Scheitelwert besitzt, geht e_r durch Null, und die augenblickliche zugeführte Leistung ist ebenfalls der Null gleich. In demjenigen Augenblick, wo e_r den Scheitelwert besitzt, geht i durch Null und die augenblickliche zugeführte Leistung ist ebenfalls der Null gleich. In den Zwischenfällen ist zu unterscheiden: 1. die Viertelperiode, in der e_r und i gleichzeitig positiv sind (Leistung positiv), 2. die Viertelperiode, in der e_r negativ und i positiv ist (Leistung negativ), 3. die Viertelperiode, in der e_r und i gleichzeitig negativ sind (Leistung positiv) und 4. die Viertelperiode, in der e_r positiv und i negativ ist (Leistung negativ). Den Verlauf von Strom, Spannung und Leistung zeigt für diesen Fall in rechtwinkligen Achsen bei sinusförmigem Verlaufe Fig. 415. Die Linie der Leistung ist mit l bezeichnet.

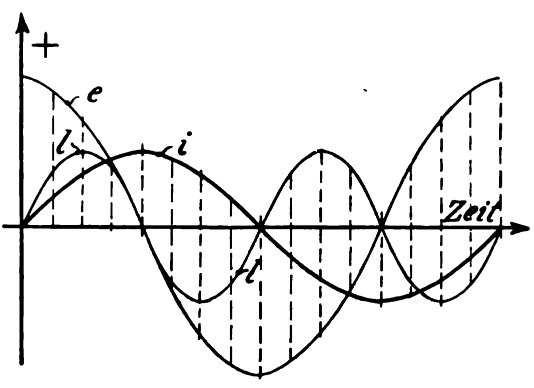


Fig. 415.

Die effektive Leistung ist in diesem Falle gleich Null, da ebensoviel Flächenteile der l-Kurve oberhalb, wie unterhalb der Achse liegen.

Es ist für die Messung von Bedeutung, daß ein Leistungsmesser in diesem Falle auch keine Leistung anzeigen würde, obgleich Strom und Spannung vorhanden ist, denn die Impulse, die der bewegliche Teil erhält, sind nach der einen Drehrichtung ebenso groß, wie nach der anderen.

Beträgt die Phasenverschiebung einen Zwischenwert zwischen 0^0 und 90^0, so liegt zu beiden Seiten zwischen Leistungslinie und Achse eine verschieden große Fläche, so daß eine Differenz der Flächen in positivem Sinne übrigbleibt, was durch Fig. 416 in rechtwinkligen Achsen ausgedrückt wird. Je kleiner die Phasenverschiebung ist, um so geringer wird der nach der negativen Seite liegende Teil, bis er bei $\varphi = 0$ ganz verschwindet. Es ist für die Messung von Bedeutung, daß ein Leistungsmesser in diesem Falle eine Leistung entsprechend dem positiven Rest anzeigen würde, der durch Subtraktion des negativen vom positiven Teile entstehen würde. Die Impulse, die auf den beweglichen Teil des Leistungsmessers nach beiden Drehrichtungen ausgeübt werden, sind zu den positiven und negativen Flächenteilen proportional, und die Einstellung erfolgt nach der Differenz der Impulse. Der Leistungsmesser zeigt daher in allen Fällen die Effektivwerte der Leistung an, die aus dem Strom und der in Richtung des Stromes liegenden Spannungskomponente gebildet werden.

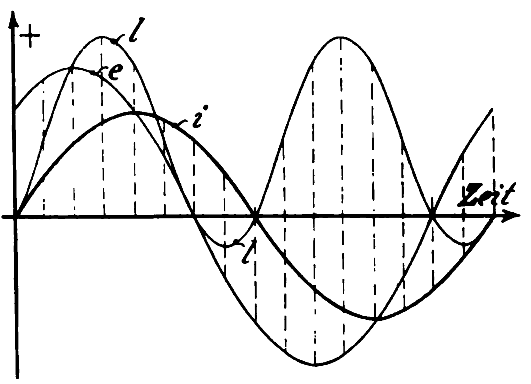


Fig. 416.

Positive Arbeit stellt von der Stromquelle an die Spule abgegebene, negative von der Spule an die Stromquelle zurückgegebene Arbeit dar. Es pendelt also, sobald Phasenverschiebung vorliegt, ein Teil der Arbeit zwischen Spule und Stromquelle hin und her, während ein anderer Teil beständig von der Stromquelle aus an die Spule abgegeben wird. Der Leistungsmesser gibt das zeitliche Mittel aus den dem letzteren Teil der Arbeit entsprechenden Werten an.

Die Polarbilder Figg. 411, 412 und 414 machen klar, daß die von einer Spule aufgenommene effektive Leistung, die sich als das zeitliche Mittel der Werte $i_a \cdot e_{wa} = i_a \cdot e_{ra} \cdot \cos\varphi$ darstellt, unter Messung von Effektivstrom I und Effektivspannung E (entsprechend e_{ra}), durch den Ausdruck gefunden wird:

$$L = E \cdot I \cdot \cos\varphi. \tag{32}$$

Man erhält die Leistung bei Wechselstrom durch Multiplikation von gemessener Spannung, gemessenem Strome und dem Kosinus des Phasenverschiebungswinkels. Der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels wird bezeichnet als der Leistungsfaktor.

Der Leistungsfaktor wird erhalten entsprechend dem Ausdruck

$$\cos\varphi = \frac{L}{E \cdot I}, \tag{33}$$

indem man die mit dem Leistungsmesser gemessene Leistung durch das Produkt aus gemessener Spannung und gemessener Stromstärke (Voltamperezahl, scheinbarer Leistung) dividiert. Das Schaltungsschema hierzu gibt Fig. 417, in der A die Wechselstrommaschine, B ein Dynamometer, C einen Wechselstrom-Spannungsmesser und D einen Leistungsmesser bedeuten. Der induktive Widerstand ist mit W bezeichnet.

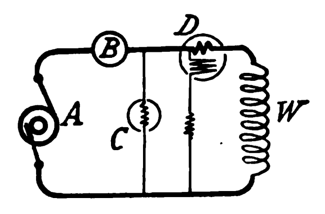


Fig. 417.

Obige Gleichungen 32 und 33 gelten nicht nur für eine gewöhnliche Spule, sondern auch für solche Fälle, wo Leistung in anderer Form als in Wärme auftritt, z. B. durch Entnahme von mechanischer Leistung an Wechselstrommotoren und durch Entnahme elektrischer Leistung an Transformatoren. In allen diesen Fällen tritt ein mit der Belastung veränderlicher Leistungsfaktor auf.

3. Beispiel. Eine Spule zeigt bei $E = 110$ Volt und $I = 30$ Ampere eine Leistung $L = 459$ Watt. Wie groß ist die Phasenverschiebung?

Die Phasenverschiebung ergibt sich aus

$$\cos\varphi = \frac{L}{E \cdot I} = \frac{459}{110 \cdot 30} = 0{,}1392 \quad \text{zu}$$

$$\varphi = 82 \text{ Grad.}$$

Wattstrom und wattloser Strom. Die Betrachtungen lehren, daß bei Wechselstrom bei erheblichen Spannungen auch erhebliche Ströme fließen können, ohne daß erhebliche Leistung auftritt. Es braucht dann nur die Reaktanz $2\nu\pi S$ mäßig groß zu sein gegen ein sehr kleines w. Diese Belastungsverhältnisse sind in Betrieben nicht erwünscht, da dieselben Leistungsverluste in den Leitungen und in den Stromerzeugern auftreten, wie bei derselben nicht verschobenen Stromstärke, und da die Zentralen, ohne Nutzen davon zu haben, diese erheblichen Verlustleistungen aufbringen müssen. Das ist vor allen Dingen der Fall, wenn viele leerlaufende Transformatoren angeschlossen sind. Große Transformatoren werden aus diesem Grunde häufig im Falle der Nichtbenutzung abgeschaltet.

Ebenso wie die Spannung, kann man auch den Strom in zwei zeitlich um 90° verschobene Komponenten zerlegt denken, während die Spannung ungeteilt bleibt. Die eine Komponente bildet der in Phase der Spannung liegende Nutzstrom, dessen Effektivwert

$$I_N = E \cdot \frac{w}{w^2 + (2\,\nu\,\pi\,S)^2} \tag{34}$$

ist, während die andere gegen die Spannung um 90° verschobene Komponente

$$I_0 = E \cdot \frac{2\,\nu\,\pi\,S}{w^2 + (2\,\nu\,\pi\,S)^2} \tag{35}$$

beträgt. Die Stromkomponente nach Gleichung 34 heißt der Wattstrom, diejenige nach Gleichung 35 der wattlose Strom. Der Gesamtstrom ist dann entsprechend der Diagonale eines Rechteckes mit den Seiten I_N und I_0 unter Einsetzung der Gleichungen 34 und 35:

$$I = \sqrt{I_N^2 + I_0^2} = \frac{E}{\sqrt{w^2 + (2\,\nu\,\pi\,S)^2}}. \tag{36}$$

4. Beispiel. Wie groß ist der Wattstrom und der wattlose Strom der im 3. Beispiel vorliegenden Spule, an der sich diese Werte bei $\nu = 50$ Perioden in der Sekunde ergeben haben sollen?

Von den Werten der rechten Seiten der Gleichungen

$$I_N = E \cdot \frac{w}{w^2 + (2\,\nu\,\pi\,S)^2}$$

und

$$I_0 = E \cdot \frac{2\,\nu\,\pi\,S}{w^2 + (2\,\nu\,\pi\,S)^2}$$

ist w und S zu berechnen.

Der wahre Widerstand ergibt sich mit den Gleichungen 27, 29, 31 und 33 zu

$$w = L : I^2 = 459 : 30^2 = 0{,}51 \text{ Ohm},$$

womit nach Beispiel 1a und Gleichung 31

$$S = \frac{1}{2\,\nu\,\pi}\sqrt{\left(\frac{E}{I}\right)^2 - w^2} = \frac{1}{2\cdot 50\cdot 3{,}14}\sqrt{\left(\frac{110}{30}\right)^2 - 0{,}51^2} = 0{,}01157 \text{ Henry}$$

gewonnen wird.

Wird w und S in obige Gleichungen eingesetzt, so ergibt sich der Nutzstrom zu

$$I_N = 110\,\frac{0{,}51}{0{,}51^2 + (2\cdot 50\cdot 3{,}14\cdot 0{,}01157)^2} = 4{,}18 \text{ Ampere}$$

und der wattlose Strom zu

$$I = 110\,\frac{2\cdot 50\cdot 3{,}14\cdot 0{,}01157}{0{,}51^2 + (2\cdot 50\cdot 3{,}14\cdot 0{,}01157)^2} = 29{,}72 \text{ Ampere.}$$

Technische Fragen. Induktive Widerstände werden technisch verwendet, hauptsächlich als Vorschaltwiderstände an Wechselstrombogenlampen und zum Anlassen von Wechselstrommotoren. Solche Spulen, für die Fig. 418 die Abbildung einer Ausführungsform gibt, werden mit Kernen aus geblättertem Eisenblech hergestellt und führen den Namen Drosselspulen. Die Vorschaltung von Drosselspulen vor Bogenlampen ist deshalb von den Stromkonsumenten bevorzugt, weil sie bei gleichem Strome und bei gleicher Spannung zwischen ihren Klemmen nach obigen Erörterungen weniger Leistung verbrauchen als induktionslose Widerstände. Die in Fig. 418 erkennbaren Ösen dienen dazu, die eingeschaltete Windungszahl zu Regelungszwecken verändern zu können.

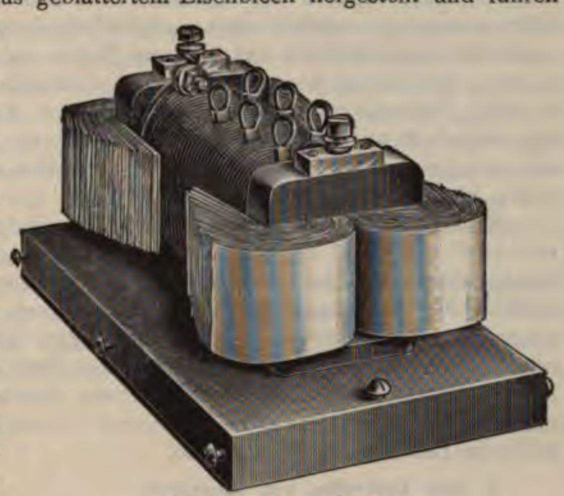


Fig. 418. Drosselspule.

Das Eisen wird an Drosselspulen angewendet, weil ihr Selbstinduktionskoeffizient dadurch bedeutend vergrößert wird. Am wirksamsten ist das Eisen, wenn der magnetische Kreis in sich geschlossen ist. Häufig wird der Strom mit einem verstellbaren Luftraum im magnetischen Kreise geregelt. Es wird geblättertes Eisen verwendet, um dem Auftreten von Wirbelströmen entgegenzuarbeiten. Eine geringe Wattkomponente kommt bei Verwendung von Eisen durch die Hysteresiserscheinung hinzu und dadurch, daß sich Wirbelströme nicht ganz vermeiden lassen. Rechnungen nach Art von Beispiel 1 und 2 dieses Paragraphen sind daher ohne weiteres bei Gegenwart von Eisen nicht zutreffend. Die weitere Verfolgung dieser Frage geschieht nach dem im Gebiet der Transformatoren angebahnten Verfahren.

Mit der Selbstinduktion erklären sich einige, z. T. schon angedeutete Erscheinungen:

Die Selbstinduktion gerader Leitungen tritt bei Telephonübertragungen besonders störend auf. Durch hohe Schwingungszahlen von Tönen ergeben sich gegen die im Starkstromgebiet vorkommenden Zahlen sehr hohe Frequenzen, mithin treten auch die behandelten Erscheinungen empfindlicher auf. Eisendrähte können überhaupt nicht verwendet werden, da jede zwischen zwei benachbarten Querschnitten liegende Schicht einen in sich geschlossenen magnetischen Kreis bildet.

Gegenseitige Verdrillung zusammengehöriger kupferner Doppelleitungen beseitigt zum großen Teile das Übel.

Im Starkstromgebiet sei hervorgehoben, daß bei eisenumhüllten Wechselstromleitungen nicht der einzelne Leiter die Eisenumhüllung erhalten darf, sondern nur sämtliche hin- und zurückführende Stromleiter zusammen erhalten eine einzige Umhüllung. Diese Angabe bezieht sich hauptsächlich auf armierte Kabel (vgl. § 40 B, S. 93) und eiserne, zur Aufnahme von Leitungen dienende Rohre (vgl. § 40 C, S. 102). Es erklärt sich durch die Angaben dieses Abschnittes, daß bei fehlerhaft angebrachter Eisenumhüllung an Wechselstromleitungen mit genügend bemessenem Querschnitt starke Spannungsabfälle auftreten können.

Schließlich erklärt sich durch die Selbstinduktion die Bemerkung von § 13 betreffend die Vermeidung von Ecken und Schleifen in den Gebäudeleitungen der Blitzableiter und die Bemerkung von § 43 betreffend die Drosselspulen und die Luftstrecken an Blitzschutzvorrichtungen. Atmosphärische Elektrizitätsmengen treten so plötzlich auf oder schwingen mit so ungeheuer hohen Frequenzen, daß für diese Erscheinungen kurze Luftstrecken leichter durchschlagen werden, als daß die Entladung ihren Verlauf durch Drosselspulen oder Schleifen bildende Leiter ihren Weg nähme.

B. Das Auftreten von Kapazität.

Eine Erscheinung, die nach ähnlichen Grundsätzen wie die Selbstinduktionserscheinungen behandelt werden kann, tritt auf beim Vorhandensein von Kapazität. Kapazität ist vorhanden, wo sich infolge statischer Erscheinungen Elektrizitätsmengen ansammeln können, oder wo infolge elektrolytischer Vorgänge die Erscheinungen einer Ansammlung von Elektrizitätsmengen für gleichwertig angesehen werden können. Eine statische Kapazität (ein Kondensator) ist im Prinzip eine Einrichtung, an der zwei (große) Metallplatten durch einen (dünnen) Isolator (Dielektrikum) getrennt einander nahe kommen. Wird diese Einrichtung in einen Gleichstromkreis eingefügt, indem jede Platte mit einem Pol der Stromquelle verbunden wird, so kann ein Gleichstrom dauernd nicht hindurchfließen, hingegen lädt sich der Kondensator mit einer Elektrizitätsmenge. Ein Kondensator, der beim Anlegen an 1 Volt eine Amperesekunde aufnimmt oder nach Wegnahme der Stromquelle eine Amperesekunde abgeben kann, hat eine Kapazität von 1 Farad. Die Kapazität ist proportional zu der bei 1 Volt aufgenommenen Elektrizitätsmenge. Mit Veränderung der Spannung ist die aufgenommene, bzw. abnehmbare Elektrizitätsmenge Q (Amperesekunden) der angelegten, bzw. von dem Kondensator angenommenen Spannung E (Volt) proportional:

$$Q = C \cdot E, \tag{37}$$

wobei C eine Konstante, nämlich die Kapazität in Farad bedeutet (vgl. § 10 und § 68 N).

Eine elektrolytische Kapazität entsteht durch Hintereinanderschaltung einer Anzahl elektrolytischer Zellen (Eisen in Sodalösung usw.), (Polarisationszellen); sie gibt infolge der Ausscheidungsprodukte (wie ein Akkumulator) Elektrizitätsmengen ab, wenn sie vorher an Spannung gelegt worden ist.

Kapazitätserscheinungen haben praktische Bedeutung dadurch, daß Kabel erhebliche Kapazität besitzen können. Geringe Kapazität besitzt jeder Leiter gegen einen zweiten oder gegen Erde, wobei die Luft das Dielektrikum bildet. Lange Kabelstrecken oder große Kabelnetze sind allmählich mit abschaltbarem Widerstand anzuschließen, damit der beim unmittelbaren Anschluß entstehende sehr starke Ladestrom vermieden wird, der mit den Erscheinungen eines Kurzschlusses auftritt; die Abschaltung von Kapazitäten kann ohne weiteres erfolgen (umgekehrt wie bei Selbstinduktionen).

An Wechselspannung gelegte Kapazitäten führen durch fortwährende Ladung und Entladung Wechselströme. Im Isoliermaterial der Kondensatoren, also auch der Kabel, tritt dabei Wärme auf, die teils durch unvollkommene Isolation als Joulesche Wärme, teils durch eine

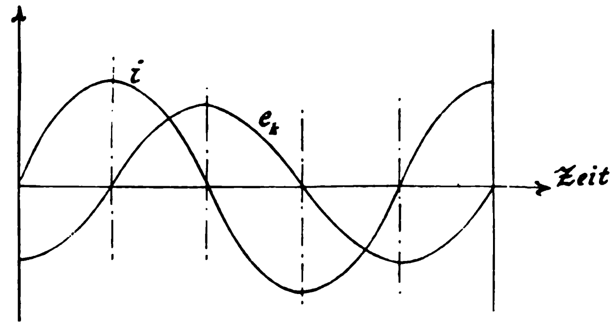


Fig. 419.

Umelektrisierung des Isoliermaterials herbeigeführt wird. Die Umelektrisierungserscheinung und der dabei auftretende Wattverlust erinnert an die Ummagnetisierungserscheinung bei Eisen. Das dielektrische Nachbleiben an Kapazitäten wird als statische Hysterese bezeichnet.

Die Spannung unmittelbar am Kondensator ist nach Gl. 37 jederzeit proportional zu der im Kondensator vorhandenen Elektrizitätsmenge. Der Kondensator besitzt bei Wechselstrom die höchste Ladung in dem Augenblick, wo die Spannung ihren Scheitelwert hat. Bis zu diesem Augenblick lädt sich der Kondensator, d. h. der Strom fließt bis zu diesem Augenblick in den Kondensator im Sinne der EMK hinein, also in der Richtung, wie er sie bei einem gewöhnlichen Widerstand aufweisen würde. Im Augenblick des Höchstwertes der Spannung ist der Strom gleich Null, und von diesem Augenblick ab entlädt sich der Kondensator, d. h. die Stromstärke kehrt ihre Richtung

um. Die Vorgänge erläutert in rechtwinkeligen Achsen die Fig. 419, die erkennen läßt, daß der Strom i um 90° der Kondensatorspannung e_k vorauseilt.[Wiss. 6]

Wird nun zugleich auch ein Widerstand w in der Zuleitung zum Kondensator berücksichtigt, so kommt eine zur Überwindung von w dienende und zum Strom proportionale Spannung e_w hinzu, die sich mit e_k zu einer Resultierenden e_r zusammensetzt. Die Werte e_r sind die Augenblicksspannungen am Anfangspunkt der zum Kondensator führenden Leitung vom Widerstande w und diejenigen Spannungen, deren Effektivwert ein am Anfangspunkt der Zuleitung angeschlossener Spannungsmesser anzeigen würde. Die Werte i sind die Augenblickswerte des Stromes, deren Effektivwert ein im Kreise befindlicher Strommesser angeben würde. Zwischen e_r und i, bzw. deren Effektivwerten E und I tritt wiederum eine Phasenverschiebung auf, und zwar eilt der Strom um einen Winkel $\varphi < 90°$ der resultierenden Spannung voraus. Die Erscheinungen sind ganz entsprechend denjenigen der Selbstinduktion, nur ist die Richtung der Verschiebung entgegengesetzt. Daher gilt auch alles entsprechend den bisherigen Gleichungen, wobei nur an Stelle des für Selbstinduktion gültigen Wertes w_s (s. Gleichung 26) der Wert

$$w_k = -\frac{1}{2\nu\pi C} \tag{38}$$

tritt. So können die Gleichungen zusammengestellt werden:

$$R = \frac{E}{I} = \sqrt{w^2 + \left(\frac{-1}{2\nu\pi C}\right)^2}, \tag{39}$$

$$\sin\varphi = \frac{-1}{2\nu\pi C\cdot R}, \tag{40}$$

$$\cos\varphi = \frac{w}{R} = \frac{L}{E\cdot I}, \tag{41}$$

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{-1}{2\nu\pi C\cdot w}, \tag{42}$$

wobei die nicht besonders aufgeführten Bezeichnungen und Deutungen entsprechend den früheren gelten sollen.

Das Polarbild Fig. 420 zeigt entsprechend dem früheren, Fig. 414, die Werte obiger Gleichungen nach Größe und Richtung aufgetragen. In Phase von w liegt I, in Phase von R liegt E.

Die Betrachtungen lehren, daß der Kondensator die Stromstärke des Kreises um so mehr verkleinert, je geringer die Kapazität ist. Der Strom wird Null für $C = 0$. Eine unendlich große Kapazität bringt dieselbe Wirkung hervor, als wenn an Stelle des Kondensators eine unmittelbare Verbindung vorhanden wäre.

Auch hier ist, wie bei Selbstinduktion, die unmittelbar meßbare Effektivspannung E größer als jede einzelne ihrer Komponenten.

Unter Benutzung der hier behandelten Erscheinung werden elektrolytische Kapazitäten zur künstlichen Herstellung einer verschobenen Phase zum Anlassen von Wechselstrommotoren verwendet (vgl. Drosselspulen).

Die Wirkungen der Kapazität bei Wechselstrom haben zur Folge, daß lange verdrillte oder nahe beieinanderliegende Leitungen (Kabel), sowie andere großflächig mit geringem Isolationsabstand gegenüberliegende Metallteile nicht durch (Ausklingeln oder andere) auf Wechselstrom beruhende Verfahren auf Isolation geprüft werden können. In solchen Fällen muß die Isolation stets mit Gleichstrom gemessen werden.

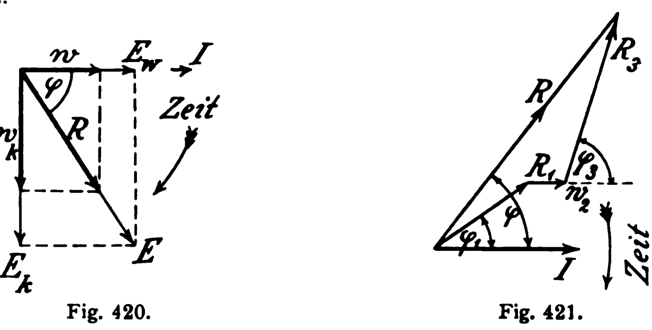


Fig. 420. Fig. 421.

C. Zusammensetzung gleichartiger Richtungswiderstände.

a) In Hintereinanderschaltung. Die Addition mehrerer Richtungswiderstände in Hintereinanderschaltung erfolgt nach Fig. 421, welche ausdrückt, daß die Einzelwiderstände nach Richtung und Größe aneinandergesetzt werden; R_1 und R_3 bedeuten Widerstände mit Selbstinduktion, w_2 einen induktionslosen Widerstand.

Die Verbindungslinie vom Ausgangspunkt bis zum Endpunkt bildet den scheinbaren Widerstand R der Schaltung. Man kommt zu demselben Ergebnis, wenn alle wahren Widerstände des Kreises addiert und auf dem Fahrstrahl des Stromes angetragen werden, während die Summe der gleichartigen Reaktanzen (entweder durch Selbstinduktionen oder durch Kapazitäten gebildet) normal zum Strome zu stehen kommt. Somit ist alles zurückgeführt auf die Angaben des § 116 A bzw. § 116 B.

Auch hier können wieder an Stelle der Widerstände die mit I multiplizierten Widerstände, d. h. die Spannungen der einzelnen Leiterteile treten. Diese Spannungen sind bei getrennten Widerständen einzeln meßbar, und gegen jede Einzelspannung hat der Strom eine besondere Phasenverschiebung (vgl. φ_1, φ_3, φ in Fig. 421).

Bei zwei Selbstinduktionen (oder zwei Kapazitäten) in Hintereinanderschaltung liegt der Phasenwinkel der Gesamtspannung gegen den Strom seiner Größe nach zwischen den Phasenwinkeln der einzelnen Leiterteile; die Gesamtspannung ist stets größer, als die größere der beiden Komponenten.

Die Messung der Leistung und Phasenverschiebung an hintereinandergeschalteten Richtungswiderständen oder an einem beliebigen Teile der Reihenschaltung wird vorgenommen, indem man Strommesser und Stromspule des Leistungsmessers an beliebiger Stelle des Stromkreises anbringt,* während Spannungsmesser und Spannungsspule des Leistungsmessers zwischen denselben Punkten liegen. Ist die Zugehörigkeit zu einem der hintereinandergeschalteten Leiterteile durch den Index ausgedrückt, während die Größen für beide Teile zusammen keinen Index tragen, so gilt:

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= E_1 \cdot I \cdot \cos\varphi_1, \\ L_2 &= E_2 \cdot I \cdot \cos\varphi_2, \\ L &= E \cdot I \cdot \cos\varphi. \end{aligned}\right\} \tag{43}$$

Spannungsmesser oder Spannungskreise von Leistungsmessern und Zählern sind im allgemeinen an eine bestimmte Frequenz gebunden. Sie sind nur dann für beliebige Frequenzen verwendbar, wenn die Reaktanz ihres Kreises verschwindend klein ist gegen ihren wahren Widerstand. Ist diese Bedingung erfüllt, so lassen die genannten Kreise auch die Verwendung zu Gleichstrom zu. Damit diese Bedingung sich erfüllt, gibt man den genannten Kreisen zweidrähtig gewickelte Vorschaltwiderstände weitaus überwiegender Ohmzahl.

An Strommesser stellt man, ebenfalls wie bei Gleichstrom, die Anforderung geringen Widerstandes. Bei Wechselstrom gehört dazu, daß außer dem wahren Widerstand auch die Reaktanz des Strommessers gegen den Richtungswiderstand des Kreises klein ist. Somit werden Leistungsmesser und Zähler erst dann brauchbar und für beliebige Frequenzen, sowie auch für Gleichstrom, verwendbar, wenn sie für den Spannungskreis die Anforderung des vorigen und den Stromkreis die Anforderung dieses Absatzes zugleich erfüllen.

Ein Strommesser, an dem zwei hintereinandergeschaltete Spulen ohne Eisen aufeinander wirken (Dynamometer), zeigt unabhängig von der Selbstinduktion seiner Spulen, also auch bei jeder Frequenz, den tatsächlich fließenden effektiven Strom an, da die Stromstärke eines Kreises für einen jeden Augenblick für jede Stelle des Kreises die gleiche ist.

b) In Nebeneinanderschaltung. Parallelgeschaltete Richtungswiderstände (R_1 und R_2) führen Ströme (I_1 und I_2) in dem Verhältnis:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2}}. \tag{44}$$

Die Ströme in jedem Zweige verschieben sich gegen die Phase der zwischen den Verzweigungspunkten auftretenden Spannung E nach

* Soweit das dem Leistungsmesser zuträglich ist (vgl. S. 383).

den bisherigen für jeden Zweig einzeln anzuwendenden Gesetzen:

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \frac{E\cos\varphi_1}{w_1}, \\ I_2 &= \frac{E\cos\varphi_2}{w_2}. \end{aligned}\right\} \tag{45}$$

Der Winkel der Verschiebung zwischen I_1 und I_2 wird erhalten, indem man die beiden Winkel φ_1 und φ_2 von demselben Fahrstrahl E aus in gleicher Richtung anträgt.

Der Zuleitungsstrom I zur Verzweigung ist die nach Richtung und Größe gebildete Summe der Einzelströme, also die Resultierende in einem Parallelogramm mit den Seiten I_1 und I_2.

Bei zwei Selbstinduktionen (oder zwei Kapazitäten) in Parallelschaltung liegt der Phasenwinkel des Zuleitungsstromes seiner Größe nach zwischen den Phasenwinkeln der einzelnen Zweige; es ist I stets größer als die größere der beiden Komponenten I_1 und I_2.

Der Ersatz-Richtungswiderstand der Verzweigung ist der Quotient, der aus der Spannung zwischen den Verzweigungspunkten und dem Zuleitungsstrom gebildet wird.

Für die Leistungen gilt mit obigen Bezeichnungen:

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= E \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1, \\ L_2 &= E \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2, \\ L &= E \cdot I \cdot \cos\varphi. \end{aligned}\right\} \tag{46}$$

Die bisherigen Betrachtungen an parallelgeschalteten Kreisen gelten nur mit Rücksicht auf die zwischen den Verzweigungspunkten auftretende Spannung. Ist eine Zuleitung zum Verzweigungspunkt zu berücksichtigen, so verfährt man mit dem Ersatzwiderstand der Verzweigung und den übrigen Widerständen des Kreises nach den für die Hintereinanderschaltung gemachten Angaben.

Parallelgeschaltete Widerstände kommen bei Strommessern vor. Die Angaben des § 115 über Meßgeräte setzen noch nicht Nebenschlüsse voraus. Für Gleichstrommesser mit Nebenschlüssen brauchen nur die wahren Widerstände der einzelnen Zweige ein bestimmtes Verhältnis zueinander aufzuweisen. Bei Wechselstrom müssen die scheinbaren Widerstände stets in demselben Verhältnis zueinander stehen. Da aber der scheinbare Widerstand von Selbstinduktion und Frequenz abhängig ist (s. Gl. 27), so ist ein Strommesser mit Nebenschluß und beliebigen Selbstinduktionen in beiden Zweigen an eine bestimmte Frequenz gebunden. Verschwindet die Reaktanz beider Kreise gegen ihren wahren Widerstand, so stellt sich auch bei Wechselstrom das Verhältnis der Ströme in jedem Falle umgekehrt zum Verhältnis der wahren Widerstände ein. Dieser Fall läßt sich bei Hitzdraht-Meßgeräten mit praktisch genügender Annäherung erreichen. Stellt man aber konstante (Eisen ausgeschlossen) Selbstinduktionskoeffizienten bei-

der Kreise her, die in demselben Verhältnis zueinander stehen, wie die wahren Widerstände, so bleibt ebenfalls für jede Frequenz das eine bestimmte Verhältnis der effektiven Ströme bestehen, nämlich dasselbe, wie dasjenige der Gleichströme. Zugleich gilt auch hier, wie bei verschwindenden Selbstinduktionskoeffizienten, der Satz, daß in der Zuleitung zur Verzweigung die gewöhnlich gebildete Summe der beiden Zweigströme auftritt, wie bei Gleichstrom, da sich unter obiger Voraussetzung beide Zweigströme um den gleichen Winkel (s. Gl. 30) gegen die zwischen den Verzweigungspunkten auftretende Spannung verschieben.

D. Kapazität und Selbstinduktion.

a) In Hintereinanderschaltung. Ein Stromlauf, der in Hintereinanderschaltung Kapazität, Selbstinduktion und Widerstand enthält, unterliegt folgenden Gesetzmäßigkeiten:

$$R = \frac{E}{I} = \sqrt{w^2 + \left(2\,\nu\pi S - \frac{1}{2\,\nu\pi C}\right)^2} \tag{47}$$

$$\sin\varphi = \frac{2\,\nu\pi S - \frac{1}{2\,\nu\pi C}}{R} = \frac{E_s - E_k}{E}, \tag{48}$$

$$\cos\varphi = \frac{w}{R} = \frac{E_w}{E}, \tag{49}$$

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{2\,\nu\pi S - \frac{1}{2\,\nu\pi C}}{w} = \frac{E_s - E_k}{E_w}. \tag{50}$$

Das Polarbild Fig. 422 zeigt entsprechend den beiden früheren Figg. 414 und 420 die Werte obiger Gleichungen nach Größe und Richtung aufgetragen. In Phase von w liegt I, in Phase von R liegt E. Die Summe der Reaktanzen, von denen auf S. 461 die Rede war, ist also hier algebraisch zu nehmen.

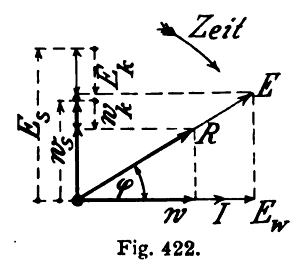


Fig. 422.

Bei Hintereinanderschaltung von Selbstinduktion, Kapazität und Widerstand bleibt die Phase des Stromes gegen die am Kreise auftretende Spannung entweder zurück, oder sie eilt vor, je nachdem die infolge von $2\,\nu\pi S$ auftretende Spannung größer oder kleiner ist, als die von $1:2\,\nu\pi C$ herrührende Spannung.

Bei bestimmter Bemessung von S, C, w und ν können sich Selbstinduktion und Kapazität gegenseitig aufheben, so daß eine Verschiebung $\varphi = 0$ eintritt.

Bei Hintereinanderschaltung einer Kapazität und einer Selbstinduktion kann jede einzelne und einzeln meßbare Spannungskompo-

nente größer sein, als die an den hintereinandergeschalteten Widerständen auftretende Spannung, wozu Fig. 423 die Erläuterung unter Voraussetzung einer widerstandslosen Kapazität (Spannung E_2, Winkel $\varphi_2 = 90^0$) und einer mit Widerstand behafteten Selbstinduktion (Spannung E_1, Winkel $\varphi_1 < 90^0$) gibt. Der Grenzfall des Vorganges ist zu denken bei $\varphi_1 + \varphi_2 = 180^0$ und $E = 0$, d. h. bei Verhältnissen, denen sich die Wirklichkeit nur nähern kann, da völlige Widerstandslosigkeit dazu gehören würde.[Wiss. 7)]

Für die Messung der Leistung gilt hier ebenfalls, was unter C, a) dieses Paragraphen angegeben ist, nur ist damit die Vorstellung zu verbinden, daß φ_1 und φ_2 nach verschiedenen Seiten liegen, und daß ein Teil der Arbeit zwischen Kapazität und Selbstinduktion hin und her pendelt, der um so beträchtlicher wird, je mehr man sich dem oben angedeuteten Grenzfall nähert (Resonanz).

b) In Nebeneinanderschaltung. Gleichungen 44 und 45 gelten in jedem Falle, wobei es gleichgültig ist, welche Ursache die Phasenverschiebung hat. Sie gelten also auch, wenn der eine Zweig Kapazität, der andere Selbstinduktion enthält. Der durch Kapazität hervorgerufene Winkel φ_1 ist hinter dem Fahrstrahl E, der durch Selbstinduktion hervorgerufene Winkel φ_2 vor dem Fahrstrahl E aufzutragen.

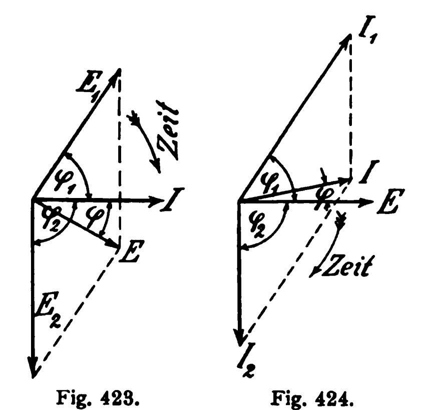


Fig. 423. Fig. 424.

Durch Parallelschalten zweier Kreise, von denen der eine Selbstinduktion und der andere Kapazität enthält, kann die Phase des Zuleitungsstromes je nach der Bemessung von Selbstinduktion, Kapazität, Widerstand und Frequenz gegen E voreilen oder nachbleiben, und es ist auch wiederum der Fall denkbar (wie bei Hintereinanderschaltung), daß der Strom der Zuleitung in die Phase der Spannung E fällt.

Die beiden Ströme I_1 und I_2 können um mehr als 90^0 auseinanderfallen, wofür Fig. 424 unter Voraussetzung einer widerstandslosen Selbstinduktion ein Beispiel gibt (als Grenze 180^0); so kann auch die Resultierende von beiden, der Strom I der Zuleitung, kleiner sein als die eine oder die andere der Komponenten, oder kleiner als jede von beiden. Sind die wahren Widerstände beider Zweige sehr klein und Kapazität und Selbstinduktion so bemessen, daß die Ströme I_1 und I_2 nahezu gleich groß werden, so ist ein sehr kleines I bei einer Verschiebung $\varphi_1 + \varphi_2$ von nahezu 180^0 und bei kleinem φ vorhanden; es tritt also hier ebenfalls wieder eine Resonanzerscheinung auf.

Für die Leistungen gelten ebenfalls die Gleichungen 46, und es

ist wiederum damit die Vorstellung zu verbinden, daß ein Teil de Arbeit zwischen Kapazitäts- und Selbstinduktionskreis hin und her spiel der um so beträchtlicher wird, je näher man der Resonanz komm

---

Die Frage, störende Selbstinduktionen mit Kapazitäten ausgleiche zu wollen, ist mit Ausnahme der Telephontechnik praktisch bedeutungslo da die räumliche Ausdehnung solcher Kondensatoren so groß aus fallen würde, daß die Ausführung infolge der Größe nicht in Frag kommt. Hingegen ist die Frage des Zusammenwirkens von Kapazit und Selbstinduktion von praktischer Bedeutung. So z. B. können a Ende einer Leitung höhere Spannungen gemessen werden, als a Ausgangspunkt.

§ 117. Wechselstromerzeuger.

Eine Möglichkeit für die Erzeugung eines Wechselstromes lie vor bei Anwendung eines Ring- oder Trommelankers, wie er aus de Gebiet der Gleichstrommaschinen bekannt ist, nur treten an Stelle d

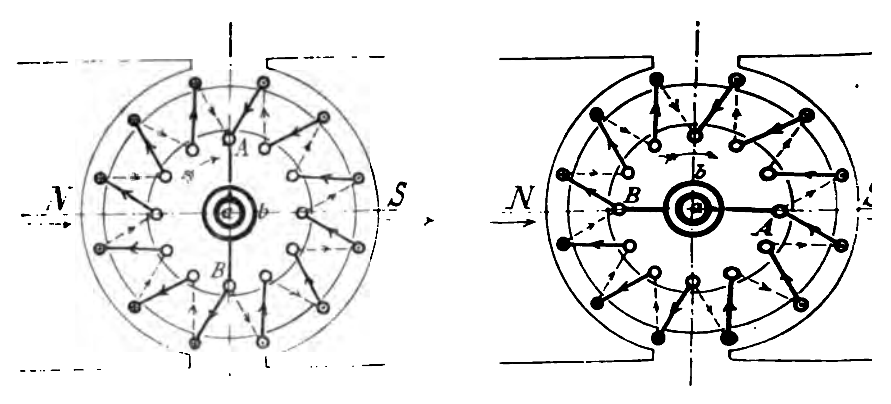


Fig. 425. Fig. 426.

Kollektors zwei Schleifringe. Zur Veranschaulichung dienen die Figg. 42 und 426, die andeuten, daß Abzweigungen von zwei gegenüberliegender Stellen A und B der in sich geschlossenen Wicklung zu den Schleif- ringen a und b führen. In der Stellung nach Fig. 425 liefern beide Zweige des umlaufenden Ringes Strom in gleichem Sinne zur Abnahme- stelle hin. Bei der angegebenen Kraftlinien- und Bewegungsrichtung ist in der durch Fig. 425 ausgedrückten Stellung A positiv, B negativ. In der Lage nach Fig. 426 schneidet jede Wicklungshälfte ebensoviel Kraftlinien in dem einen, wie im entgegengesetzten Sinne, so daß für diese Stellung die Induktionsspannung gleich Null ist. In Zwischen- stellungen erfolgt ein allmählicher Übergang zu abfallender bzw. steigender Induktionsspannung. Befindet sich bei weiterem Umlauf der Punkt A

in tiefster Stellung, so ist A negativ und B positiv usw.; ein Wechselstrom kann also den Schleifringen entnommen werden.

An Stelle der zwei in Figg. 425 und 426 angedeuteten Pole können auch 4, 6, 8 Pole usw. treten, wobei ebensoviel Abzweige von der Ankerwicklung zu den Schleifringen führen, falls reine Parallelschaltung vorliegt.

Da der Kollektor, der bei Gleichstrommaschinen den empfindlichsten Teil bildet, bei Wechselstrom fortfällt, wird durch ihn die Wahl der Spannung nicht beeinflußt.

Eine Maschine der bisher beschriebenen Art zeigt Fig. 427.

Die Abbildung zeigt außer der Wechselstrommaschine auch eine Erregermaschine. Zur Erregung wird Gleichstrom verwendet. Wo sonst kein Gleichstrom vorhanden ist, wird daher eine besondere Gleichstrommaschine hierfür notwendig. Diese Maschine wird gewöhnlich mit der Wechselstrommaschine auf eine Achse gesetzt, oder mit ihr unmittelbar gekuppelt.

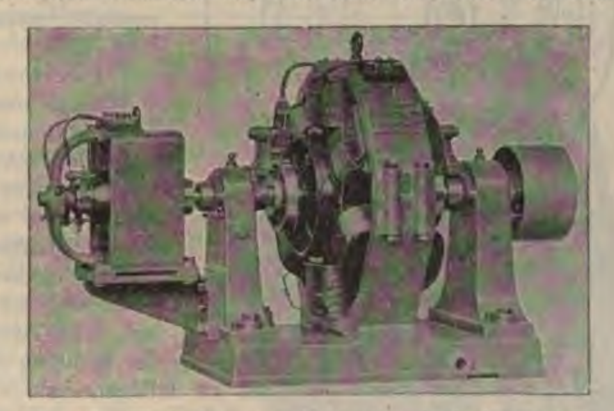


Fig. 427. Wechselstrommaschine mit umlaufendem Anker.

Erregermaschinen sind meistens Nebenschlußmaschinen mit Nebenschlußregler und werden fast ausnahmslos allein zur Erregung des Wechselstromerzeugers benutzt. Ihre Leistung beträgt, je nachdem es die Wechselstrommaschine erfordert, etwa 5 % der Leistung des Wechselstromgenerators. Soll die Spannung des letzteren bei einer bestimmten Umlaufszahl geregelt werden, so geschieht das durch Einstellung der Kurbel des Nebenschlußreglers an der Erregermaschine, wodurch sich zugleich der Strom in ihrem Hauptkreise, der Magnetwicklung der Wechselstrommaschine, ändert. Diese Schaltungsweise bezweckt die Erregerverlustleistung möglichst gering zu halten. Außer Nebenschlußmaschinen kommen auch Hauptschlußmaschinen für die Erregung in Betracht.

In der häufigsten Anordnungsweise der Wechselstrommaschinen steht der Anker fest, während sich der Magnetkranz innerhalb der Ankerbohrung dreht. Der Anker besteht aus geblättertem Eisen, das

durch ein besonderes Gehäuse gehalten wird. Die das Eisen zusammenpressenden Bolzen werden zur Vermeidung von Wirbelströmen isoliert eingesetzt. Es ist die Möglichkeit vorhanden, einzelne Ankerspulen nach dem Schema der Fig. 428 zu verwenden, die alle hintereinandergeschaltet sind und ihre Enden in der Abbildung bei *I* und *II* haben; *a* und *b* sind die Schleifringe, denen in dieser Anordnung der Erregergleichstrom zugeführt wird.

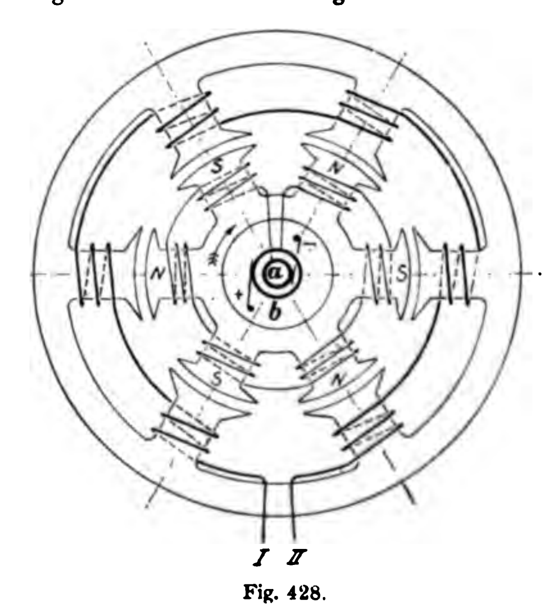


Fig. 428.

Die Richtung des Wechselstromes, der in einer bestimmten Stellung des Polrades erzeugt werden würde, ergibt sich nach der Regel der rechten Hand, nur ist zu berücksichtigen, daß die Einstellung des Daumens in der Richtung der Relativbewegung der Drähte gegen das Feld zu erfolgen hat, also umgekehrt, als in der Umlaufsrichtung des Polrades.

Der Vorteil der feststehenden Anker gegen bewegte liegt darin, daß die meistens Hochspannung führende Ankerwicklung nicht der

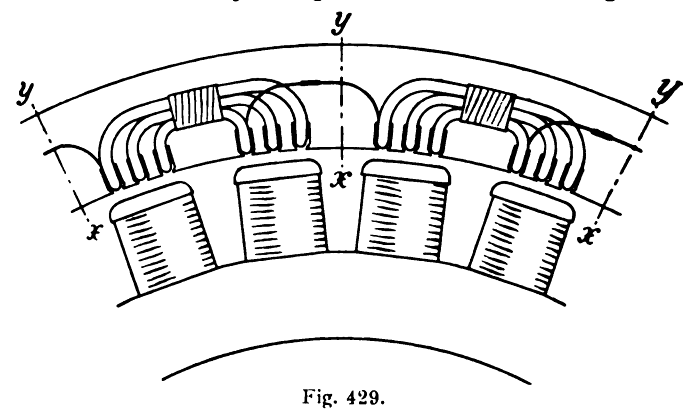


Fig. 429.

Fliehkraft ausgesetzt ist, durch die bei laufender und ruhender Maschine Lagenänderung der Drähte hervorgerufen werden würde, die eine

allmähliche Verschlechterung der Isolation herbeiführen könnte. Für die Magnetwicklung ist das von geringerer Bedeutung, da es sich um Niederspannung handelt.

Fig. 428 ist nur als Schema anzusehen. Eine Bemessung des Ankereisens nach dieser Figur würde zu unzweckmäßiger Spannungskurve führen. Üblicherweise bringt man die Ankerdrähte in Nuten unter und zwar häufig unter Anwendung der Spulenwicklung, worunter das Schema der Fig. 394 verstanden sein möge. Eine Anordnungsweise nach diesem Schema mit dreifach abgeteilten Spulen zeigt Fig. 429 für einen Teil der Maschine.

Diese Anordnungsweise hat den Vorzug, daß das Ankereisen gemäß den Linien xy unterteilt werden kann, ohne daß die einzelnen Ankerspulen über die Trennstelle hinwegreichen. Dadurch ist ein solcher Sektor bei etwaigem Schadhaftwerden einer Spule leicht auswechselbar gegen ein fertig vorbereitetes Ersatzstück, da von einem Sektor zum anderen nur je ein Verbindungsdraht führt. Zur Auswechslung der Ankerteile werden die Sektoren von außen eingesetzt. Diese Anordnung ist bei der durch Fig. 430 abgebildeten Maschine gewählt. Der Anker mit den ihn tragenden Armen ist nach Lösen einiger Schrauben drehbar, so daß der schadhafte und abzuhebende Sektor nach oben gebracht und mit einem Kran angefaßt werden kann. Die Teile, um die sich der Anker klinken läßt, sind zum Einbringen der Welle und des Polrades oben teilweise abnehmbar.



Fig. 430. Wechselstromerzeuger mit feststehendem Anker.

Eine Grundanschauung über die elektrischen Vorgänge bei der Belastung einer Wechselstrommaschine mögen die Schaubilder Figg. 431 bis 433 geben. Vorgänge, die verwickeltere Darstellung erforderlich machen würden, sind dabei unberücksichtigt geblieben.

Fig. 431 stellt einen Fall bei selbstinduktionslosem Außenkreise

dar; E bedeutet die EMK, K die Klemmenspannung der Maschine; $I \cdot w_A$ ist der Spannungsabfall durch den wahren Widerstand, $I \cdot w_{SA}$ derjenige, der durch die Reaktanz der Ankerwicklung auftritt; E und K verschieben sich daher um einen Winkel φ. Für konstantes K wird φ und E bei zunehmendem Strome größer.

Fig. 432 zeigt bei derselben EMK und dem gleichen Strome I das Schaubild an derselben Maschine bei Selbstinduktion im Außenkreise. K ist in diesem Falle geringer, als bei induktionsloser Belastung; w ist der wahre Widerstand, w_S die Reaktanz des Außenkreises. E und K haben verschiedene Phasenwinkel gegen den Strom.

Fig. 433 verdeutlicht den Vorgang unter Annahme der kurz geschlossenen Maschine ($K = 0$) bei der gleichen EMK wie oben und unter Annahme eines konstanten Selbstinduktionskoeffizienten. Das Dreieck

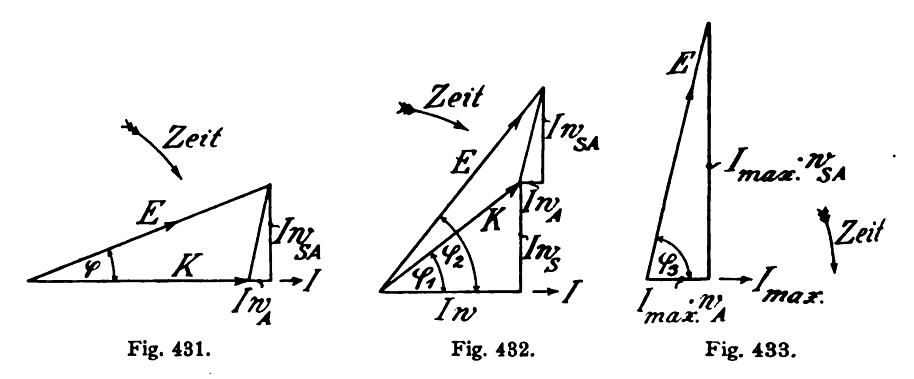


Fig. 431. Fig. 432. Fig. 433.

dieses Schaubildes ist somit ähnlich demjenigen, das in den Figg. 431 und 432 für die Maschine gilt. In demselben Maße, wie die Seiten dieses Dreieckes größer sind, als die vorigen, ist der Kurzschlußstrom größer, als der Strom in dem Belastungsfalle von Figg. 431 und 432. Der Kurzschlußstrom kann bei Wechselstrommaschinen infolge ihrer Reaktanz nicht in dem Maße steigen, wie bei Gleichstrommaschinen, nimmt aber in der Regel immerhin verderbliche Höhe an, wenn eine normale Maschine normal erregt ist.

Zur Beurteilung von Wechselstrommaschinen lassen sich eine Reihe von Charakteristiken aufstellen, von denen

1. die Leerlaufspannung in Abhängigkeit von der Erregerstromstärke,
2. die Klemmenspannung, a) bei induktionsloser, b) bei induktiver Belastung ($\cos \varphi = \text{const.}$), bei konstanter Erregung in Abhängigkeit von dem Belastungsstrome,
3. die Erregerstromstärke, a) bei induktionsloser, b) bei induktiver Belastung ($\cos \varphi = \text{const.}$), bei konstanter Klemmenspannung in Abhängigkeit von dem Belastungsstrome und
4. die Kurzschlußcharakteristik

die wichtigsten sind.

Unter der Kurzschlußcharakteristik versteht man eine Kurve, deren Punkte in folgender Weise gewonnen werden: Man läßt die Maschine zunächst unerregt mit der normalen Umlaufszahl bei kurzgeschlossenen Klemmen unter Einschaltung eines Strommessers laufen. Dann erregt man mit langsam von Null aus steigendem Erregerstrome, bis der Wechselstrommesser einen bestimmten Strom anzeigt, zu dem der zugehörige Erregerstrom $I_{Err.}$ abgelesen wird. Nach Wegnahme des Erregerstromes öffnet man die Klemmen der Maschine und legt an sie einen Spannungsmesser. Wird nun der Erregerstrom wieder auf den oben gefundenen Wert $I_{Err.}$ gebracht, so zeigt der Spannungsmesser eine Voltzahl, die als höchster Spannungsabfall bei induktiver Belastung für die betreffende Ankerstromstärke angesehen werden kann (Kurzschlußspannung). Man erhält für verschiedene Kurzschlußstromstärken eine Reihe von Kurzschlußspannungen. Da der Selbstinduktionskoeffizient der Maschine durch Gegenwart des Eisens mit dem Strome veränderlich ist, erhält man nicht etwa eine gerade, sondern eine gekrümmte Linie, wenn die Kurzschlußspannungen in Abhängigkeit von den Kurzschlußströmen aufgetragen werden. Die so entstehende Kurve heißt die Kurzschlußcharakteristik.

Die sekundliche Umlaufszahl n' an Wechselstromgeneratoren ist durch die sekundliche Periodenzahl ν und durch die Polzahl Z bestimmt nach dem Ausdruck

$$n' = 2\,\nu : Z; \qquad (51)$$

es gelten dafür beispielsweise folgende Werte:

Periodenzahl in der Sekunde	Polzahl	Umläufe in der Sekunde	Umläufe in der Minute
ν	Z	n'	n
50	2	50	3000
	4	25	1500
	6	16,66 ...	1000
	8	12,5	750
25	2	25	1500
	4	12,5	750
	6	8,33 ...	500
	8	6,25	375

§ 118. Die Transformatoren.

Ein geschlossener magnetischer Kreis ist von zwei voneinander isolierten Spulen umgeben (Fig. 434). Durch die eine Spule fließt ein von der Maschine kommender Wechselstrom, der einen wechselnden Kraftfluß erzeugt. Der wechselnde Kraftfluß durchsetzt auch die andere Spule, an der dadurch Spannung induziert wird. Die erste heißt die primäre, die zweite die sekundäre Spule.

Ist der Transformator unbelastet, d. h. wird der Sekundärspule kein Strom entnommen, so ist die Einrichtung in ihrer Wirkungsweise

als eine Drosselspule aufzufassen. Sie nimmt nahezu nur wattlosen Strom auf. In der Wattkomponente liegen nur die Ströme entsprechend der Wärme im primären Kupfer und der Wärme im Eisen (Hysteresis und Wirbelstrom), also Werte, die gering gehalten werden. Er verbraucht daher im unbelasteten Zustande nur geringe Leistung zur Deckung der in ihm auftretenden Verluste.

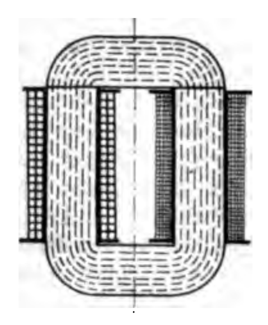


Fig. 434.

Werden die Verluste vollständig vernachlässigt, so ist die primäre Spannung e gegen den primären Strom i als um 90° verschoben anzusehen (Fig. 435). Der den Transformator durchsetzende Kraftfluß werde zunächst in Phase des Stromes und proportional zum Strome angenommen, so daß mit verändertem Maßstab die für i in Fig. 435 angegebene Kurve auch als Kurve des Kraftflusses angesehen werden kann. Die das Eisen ebenfalls umgebende Sekundärspule erhält durch die Änderungen des Kraftflusses $\mathfrak{N}$ induzierte elektromotorische Kräfte, die nach dem allgemeinen Induktionsgesetz proportional zur Schnittgeschwindigkeit $\mathfrak{B}$ sind, wobei die Werte $\mathfrak{B}$ die für einen bestimmten Neigungswinkel der $\mathfrak{N}$-Kurve auf die Sekunde gerechnete Anzahl geschnittener Kraftlinien bedeuten.

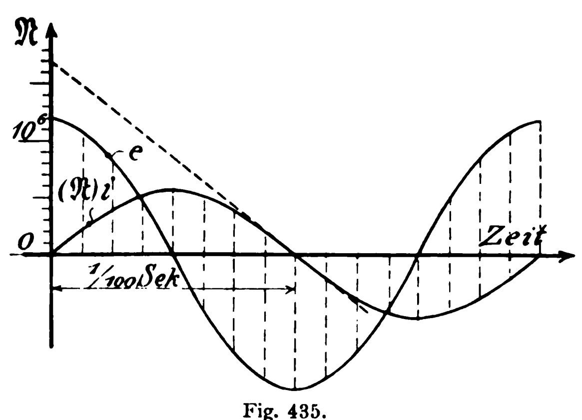


Fig. 435.

Sei z. B. in Fig. 435 $\mathfrak{N}$ im Höchstwert (entsprechend einem Eisenquerschnitt von 100 qcm und einem Höchstwert der magnetischen Dichte $\mathfrak{B} = 5000$) zu 500000 angenommen, so trifft die Tangente an $\mathfrak{N}$ im Punkte ($i = 0$ bzw.) $\mathfrak{N} = 0$ nach einem Wechsel, der als $^1/_{100}$ Sekunde angenommen sein möge, beispielsweise auf $\mathfrak{N} = 1700000$, so daß $\mathfrak{B} = 100 \cdot 1700000 = 170000000$ Kraftl./Sek. wird. Für eine um den Kraftfluß geführte Windung, gleichgültig, ob primär oder sekundär, wird dadurch eine Spannung

$$e = 170000000 \cdot 10^{-8} = 1,7 \text{ Volt}$$

erzeugt.

Diese Spannung ist mit der primären Windungszahl Z_1 zu multiplizieren, damit der Augenblickswert der Selbstinduktionsspannung der

primären Spule für diesen Augenblick gewonnen wird

$$e_1 = Z_1 \cdot e. \tag{52}$$

Multipliziert man diese Spannung mit der sekundären Windungszahl, so erhält man den zugehörigen Augenblickswert der Sekundärspannung

$$e_2 = Z_2 \cdot e. \tag{53}$$

Die Spannung e ist da am größten, wo die Neigung der $\mathfrak{N}$-Kurve gegen die zeitliche Achse am größten ist, dort gleich Null, wo die $\mathfrak{N}$-Kurve für einen Augenblick (an ihrem Scheitelwert) mit der zeitlichen Achse parallel verläuft; der Anstieg für e von Null zum Scheitelwert erfolgt entsprechend der Zu- bzw. Abnahme der Neigung der $\mathfrak{N}$-Kurve. Für sinusförmiges $\mathfrak{N}$ folgt ein sinusförmiges e.

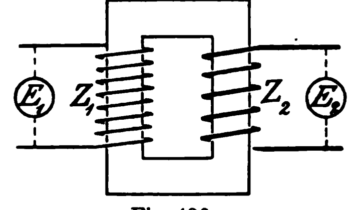


Fig. 436.

Bei der Annahme, daß der Kraftfluß in jedem Augenblick für jeden Teil (primär und sekundär) die gleiche Anzahl von Kraftlinien führt, folgt, daß das Übersetzungsverhältnis

$$\varepsilon = \frac{e_1}{e_2} = \frac{Z_1 \cdot e}{Z_2 \cdot e} = \frac{Z_1}{Z_2} \tag{54}$$

sein muß.

Was hier für Augenblickswerte gesagt ist, gilt auch für die Effektivwerte, so daß unter den bisher angeführten beschränkenden Voraussetzungen, die für einen leerlaufenden Transformator technischer Ausführung mit für die Technik genügender Annäherung erfüllt sind, der Satz gilt:

Das Übersetzungsverhältnis eines Transformators im Leerlauf ist gegeben durch das Verhältnis der primären und sekundären Windungszahlen (Fig. 436):

$$\varepsilon = E_1 : E_2 = Z_1 : Z_2. \tag{55}$$

Zur Vervollständigung des obigen Zahlenbeispieles würde es also gehören, unter Voraussetzung sinusförmigen Stromes für $E_1 = 4000$ Volt und $E_2 = 220$ Volt

$$\text{primär} \quad Z_1 = \frac{4000 \cdot \sqrt{2}}{1,7} = 3328 \text{ Windungen und}$$

$$\text{sekundär} \quad Z_2 = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{1,7} = 183 \text{ Windungen}$$

anzugeben.

Auf Grund des Satzes, daß ein entstehender Strom in der primären Spule in Richtung der Kraftlinien gesehen einen umgekehrt gerichteten Strom in der Sekundärspule erzeugt, ist die Primärspannung

im Verhältnis zur Sekundärspannung als Wirkung und Gegenwirkung aufzufassen.

In der Transformatorentechnik werden alle Größen in den Schaubildern auf eine Seite bezogen, als ob $Z_1 = Z_2$ wäre, so daß das den bisher behandelten Vorgängen entsprechende Polarbild sich durch Fig. 437 ausdrückt, in der die den Effektivwerten entsprechenden Pfeile E_1 und E_2 in einer Geraden nach verschiedenen Seiten und gleich groß aufgetragen sind, während das den Kraftfluß erzeugende I normal zu den Fahrstrahlen beider Spannungen liegt.

E_1 und E_2 bedeuten die elektromotorischen Kräfte beider Spulen. Zu ihnen steht auch in weiteren Fällen die den Kraftfluß erzeugende Amperewindungszahl $\mathfrak{Z}$ normal, so daß eine Erleichterung der Übersicht in den späteren Schaubildern dadurch erreicht wird, daß die hier genannten Fahrstrahlen dick hervorgehoben sind. So z. B. ergibt sich unter Berücksichtigung des in der Primärspule auftretenden Widerstandes unter Vernachlässigung weiterer Erscheinungen die Fig. 438, aus der erkannt wird, daß die primäre Klemmenspannung K_1 größer ist, als die (primäre mit E_1 bezeichnete) EMGK. Die Klemmenspannung bildet bereits einen von 90^0 verschiedenen Phasenwinkel gegen den (primären) Strom.

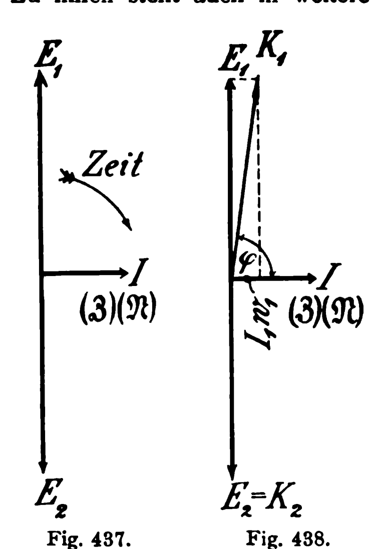


Fig. 437. Fig. 438.

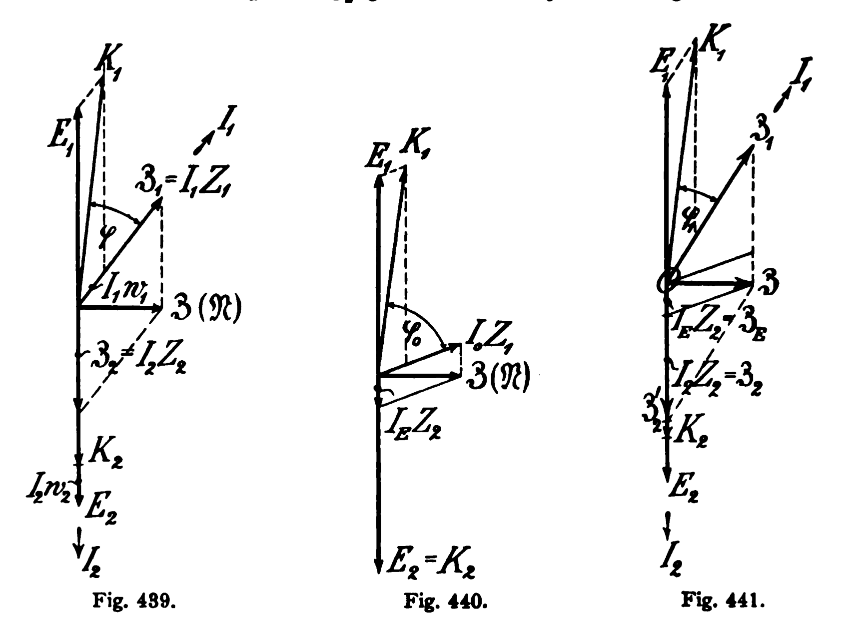
Wird der Transformator belastet, d. h. entnimmt man seiner Sekundärseite Strom, so treten auch sekundär Amperewindungen auf; Amperewindungen vertreten in magnetischen Kreisen die Rolle, die die Spannungen in elektrischen Kreisen haben; am Transformator sind zu unterscheiden die primären Amperewindungen $\mathfrak{Z}_1$, die die magnetomotorische Kraft darstellen, die sekundären Amperewindungen $\mathfrak{Z}_2$, die eine magnetomotorische Gegenkraft bilden, und schließlich die resultierenden Amperewindungen $\mathfrak{Z}$, die den Kraftfluß erzeugen, und die, auf einen elektrischen Gleichstromkreis übertragen, der Differenz (EMK — EMGK) entsprechen.

Am Transformator sind die einzelnen Amperewindungen nach Richtung und Größe unter Zuhilfenahme der Parallelogrammkonstruktion mit zeitlichen Winkeln zu bilden.

Die sekundären Amperewindungen sind im Leerlauf gleich Null und konnten daher in den bisherigen Schaubildern nicht auftreten. Die Komponenten der primären und sekundären Amperewindungen liegen in der Phase der zugehörigen Ströme.

Wird der sekundäre Belastungskreis selbstinduktionslos angenommen, so liegt der Sekundärstrom in Phase der sekundären Spannung; von der sekundär erzeugten EMK (bezeichnet mit E_2) ist die in derselben Phase liegende sekundäre Verlustspannung $I_2 \cdot w_2$ abzuziehen, damit die sekundäre Klemmenspannung K_2 erhalten wird, wobei I_2 die sekundäre Stromstärke und w_2 den wahren Widerstand der Sekundärspule bedeutet. In derselben Phase mit I_2 liegt die sekundäre Amperewindungszahl $\mathfrak{Z}_2 = I_2 \cdot Z_2$.

Die zur Magnetisierung erforderlichen Amperewindungen $\mathfrak{Z}$ und die zur Überwindung von $\mathfrak{Z}_2$ gehörenden Amperewindungen kann die



primäre Seite nur aufbringen, indem der Primärstrom sich gegen Fig. 437 mehr zur Phase der Primärspannung hin dreht. Mit diesen Angaben wird das unter Annahme selbstinduktionslosen Sekundärkreises gültige Schaubild Fig. 439 verständlich. Durch die Resultierende aus $I_1 Z_1$ und $I_2 Z_2$ wird das Eisen magnetisiert.

Die Betrachtung lehrt: Der Transformator vergrößert mit Belastung der Sekundärseite seinen Strom und bewegt den Primärstrom näher zur Phase der primären Spannung hin, so daß auch die aufgenommene Leistung sich vergrößert.

Nunmehr können die Eisenverluste berücksichtigt werden. Sie bestehen aus der Verlustleistung der Hysterese (L_H) und der Wirbelströme (L_W). Da es sich um eine tatsächlich abgegebene (in sekundliche Wärme umgesetzte) Leistung handelt, denkt man sich den Sekundär-

strom um einen dem Eisenverlust entsprechenden Betrag vergrößert. Es entsteht dadurch für den leerlaufenden Transformator das Schaubild Fig. 440, in dem der dem Eisenverlust entsprechende Strom mit I_E, der primäre Leerlaufstrom mit I_0 und der primäre Phasenverschiebungswinkel zwischen K_1 und I_0 mit φ_0 bezeichnet ist.

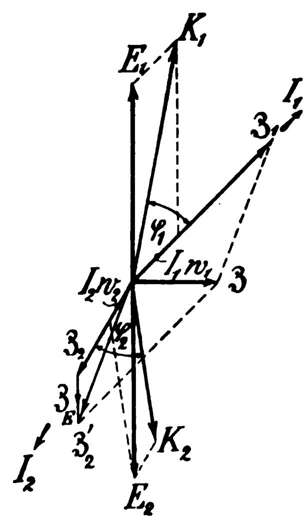


Fig. 442.

Für induktionslose Belastung mit Berücksichtigung der Eisenverluste gilt Fig. 441, eine Vereinigung von Figg. 439 und 440.

Bei Selbstinduktion im Sekundärkreise bildet die sekundäre EMK E_2 die Resultierende aus der in Phase von I_2 liegenden durch den wahren Widerstand w_2 der Sekundärwicklung auftretenden Verlustspannung $I_2 w_2$ und aus der sekundären Klemmenspannung K_2. Zugleich mit Berücksichtigung der Eisenverluste entsteht dadurch Fig. 442.

Die resultierenden sekundären Amperewindungen $\mathfrak{Z}'_2$ werden erhalten, indem man die wirklichen sekundären Amperewindungen $\mathfrak{Z}_2$ mit den in Richtung von E_2 liegenden Eisenamperewindungen zusammensetzt. Die Betrachtung lehrt, daß induktive Belastung im Sekundärkreise bei gleichem I_2 ein vergrößertes I_1 und φ_1 beansprucht.

Das Dreieck $O\,\mathfrak{Z}\,\mathfrak{Z}_1$ kann aus dem Schaubild Fig. 441 herausgegriffen und zu einem Rechteck nach Fig. 443 vervollständigt werden, als ein Sinnbild für die Zerlegung des tatsächlich fließenden Primär-

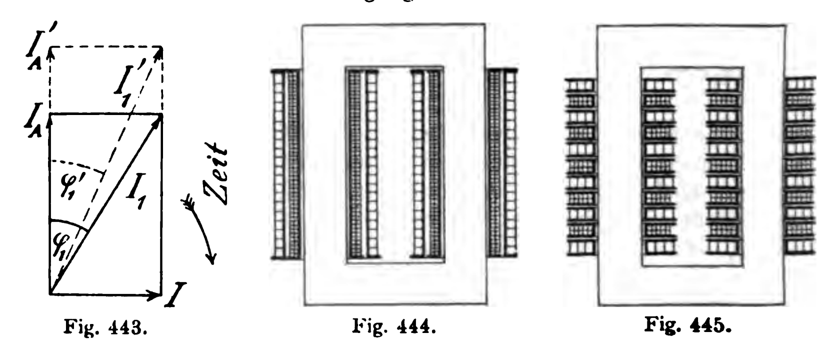


Fig. 443. Fig. 444. Fig. 445.

stromes I_1 in eine Erregungskomponente I und eine Arbeitskomponente I_A; mit zunehmender Belastung vergrößert sich I_A und verkleinert sich φ_1, während I angenähert konstant bleibt.

Geht nicht der gesamte, von der Primärspule erzeugte Kraftfluß

durch alle Windungen der Sekundärspule hindurch, treten vielmehr Kraftlinien aus dem Eisen aus, die sich außerhalb der Sekundärwindungen schließen, so wird die sekundäre EMK dadurch verringert.

Diese Erscheinung tritt mit steigender Belastung stärker auf, weil mit ihr die Gegenamperewindungen und die magnetischen Potentialdifferenzen am Eisen größer werden.

Die Folge dieser Erscheinung ist eine Vergrößerung des Spannungsabfalles in der Belastung gegen die bisher angeführten Spannungsabfälle. Man nennt diese Erscheinung die Streuung.



Fig. 446. Transformator (Kerntype).

Damit die Streuung gering gehalten wird, ordnet man entweder die primäre und die sekundäre Wicklung mit geringem Abstand übereinander an (Fig. 444), oder man unterteilt die Spulen und schichtet abwechselnd primäre und sekundäre Teile übereinander (Fig. 445).

Je nach der Anordnung unterscheidet man Kerntransformatoren und Manteltransformatoren. Bei Kerntransformatoren (Figg. 444 bis 446) bilden die Wicklungen den wesentlichen Teil der äußeren Begrenzung. Bei Manteltransformatoren umgibt das den Magnetkern der Spulen schließende Eisen die Wicklung zu einem wesentlichen Teil nach Fig. 447.

Eine Möglichkeit für das Einbringen der Bleche in das Spulen-

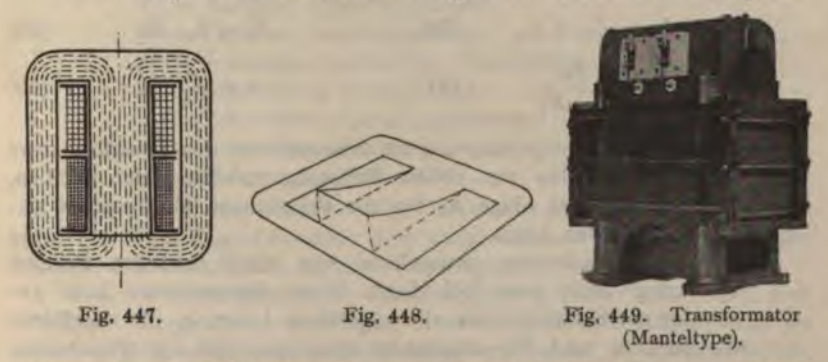


Fig. 447. Fig. 448. Fig. 449. Transformator (Manteltype).

system der Manteltransformatoren wird durch Fig. 448 verdeutlicht: der Kern wird paketweise durch die Spulen gesteckt, während der

Mantel über das Spulensystem gezogen wird. Die Stoßstellen der einzelnen Pakete werden abwechselnd versetzt. Eine andere Anordnung ist durch Fig. 449 dargestellt.

Die modernen Typen sowohl bei Kern-, als auch Manteltransformatoren besitzen fast ausnahmslos aus einzelnen Teilen zusammengesetzte magnetische Kreise, deren stumpfe Stoßstellen genau eben bearbeitet und so angeordnet sind, daß die Bleche nur hochkant aufeinanderkommen. Die einzelnen Teile des Eisens sind durch Bolzen so zusammengehalten, daß die Stoßstellen fest aufeinandergepreßt werden. Bei Kerntransformatoren gibt man dem Spulenkern gewöhnlich einen Querschnitt nach Fig. 450 unter Anwendung runder Spulen. Durch die Hohlräume zwischen Eisen und Spule streichende Luft trägt zur Kühlung bei.

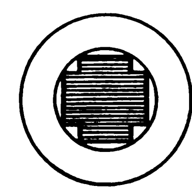


Fig. 450. Kernquerschnitt.

Vielfach, und ausnahmslos bei hohen Spannungen, wird der Transformator unter Anwendung eines eisernen Behälters ganz unter Öl gesetzt.

Die Technik kommt bei Transformatoren zwischen 1 und 100 KW etwa auf 92 bis 97,5 % Wirkungsgrad.

Zur Untersuchung eines Transformators sind folgende Messungen vorzunehmen:

1. Die Messung des wahren Widerstandes der Primärwicklung (w_1) und der Sekundärwicklung (w_2).
2. Die Leerlaufprobe zugleich mit Messung des Übersetzungsverhältnisses ε: Man mißt bei offenem Sekundärkreise den Leerlaufstrom I_0, die Klemmenspannung K_1, die Leerlaufsleistung L_0 und die sekundäre Klemmenspannung K_2, die gleich der sekundären EMK ist.

   Wegen der Kleinheit von $I_0 \cdot w_1$ und, weil der Winkel φ_0 nahezu $= 90^0$ ist, kann praktisch $K_1 = E_1$ gesetzt werden und:

$$L_0 = L_H + L_w \qquad (56)$$

$$I_E = L_0 : K_2 \qquad (58)$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{L_0}{I_0 \cdot K_1} \qquad (57)$$

$$\varepsilon = K_1 : K_2 \qquad (59)$$

   Es hat sich ergeben, daß die Eisenverluste des Transformators vom Leerlauf bis zur vollen Belastung nahezu gleich bleiben, so daß auch das obige I_E für alle Belastungen als konstant angesehen werden kann.
3. Die Kurzschlußprobe: Ausgehend von einer niedrigen Primärspannung mißt man bei durch einen Strommesser kurz geschlossener Sekundärspule die zugeführte Leistung, die zugeführte Stromstärke und die zugeführte Spannung auf der Primärseite in dem Falle, daß I_2 seinen höchsten vorkommenden Wert besitzt. Seien die für diesen Fall gültigen Werte mit L_K, I_1 und

K_K bezeichnet, so kann mit genügender Annäherung gesetzt werden:

$$L_K = I_1^2 w_1 + I_2^2 w_2 + L'_W, \tag{60}$$

wobei L'_W den Wirbelstromleistungsverlust in den Kupferwindungen bedeutet.

K_K ist der größte vorkommende Spannungsverlust im Transformator und zwar bei induktiver Belastung im Sekundärkreise, wo der Spannungsverlust größer ist, als bei induktionsloser Belastung; K_K schließt den Spannungsverlust durch Streuung in sich.

4. Für genauere Prüfung ist der Transformator tatsächlich (mit oder ohne Selbstinduktion im Sekundärkreise) zu belasten, wobei die

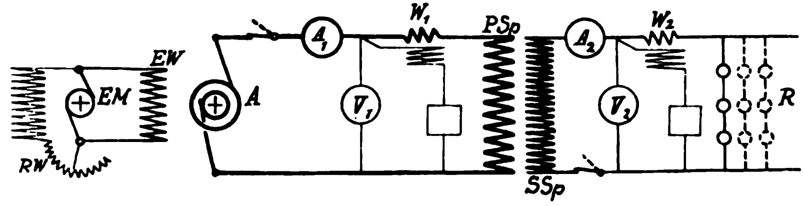


Fig. 451.

primären Werte K_1, I_1, L_1 und die sekundären K_2, I_2, L_2 zu beobachten sind. Ein Beispiel eines Schaltungsschemas hierfür (bei Transformation nach oben) gibt Fig. 451.

Dabei bedeutet:

EM = Erregermaschine des Wechselstromerzeugers,
RW = Reglerwiderstand der Erregermaschine,
EW = Erregerwicklung der Wechselstrommaschine,
A = Anker der Wechselstrommaschine,
PSp = Primäre Spule des Transformators,
A_1 = Primärer Strommesser,
V_1 = Primärer Spannungsmesser,
W_1 = Primärer Leistungsmesser,
SSp = Sekundäre Spule des Transformators,
A_2 = Sekundärer Strommesser,
V_2 = Sekundärer Spannungsmesser,
W_2 = Sekundärer Leistungsmesser,
R = Belastungswiderstand.

Auf Grund der durch obige Versuche sich ergebenden Werte kann das den Figg. 441 oder 442 entsprechende Schaubild für den belasteten Transformator maßstäblich aufgestellt werden.

Sollen Transformatoren in Parallelschaltung gut arbeiten, d. h. eine Belastung entsprechend derjenigen ihres Gebietes bekommen, falls sie primär und sekundär ein gemeinsames Netz haben, so ist erforderlich, daß das Übersetzungsverhältnis der Windungen und die Kurzschlußspannung K_K gleich ist, während die durch Ohmschen Spannungs-

verlust herbeigeführten Abfälle der Spannung nur in weiteren Grenzen angenähert gleich zu sein brauchen. Beim Parallelschalten ist darauf zu achten, daß der Wickelsinn der primären und der sekundären Spulen zueinander an allen Transformatoren der gleiche ist (also nicht etwa primär parallel, sekundär hintereinander, was einen Kurzschluß bedeuten würde). Man erkennt die richtige Schaltung daran, daß bei

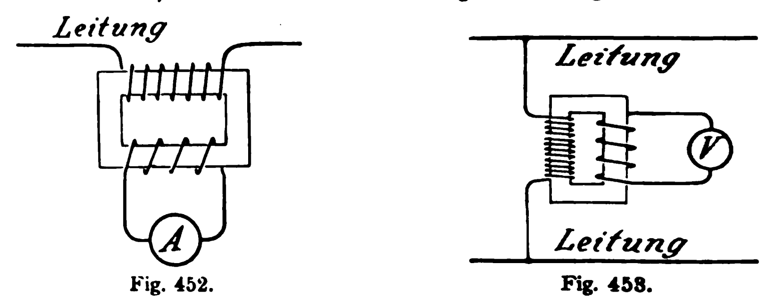


Fig. 452. Fig. 453.

angeschlossener Primärseite und einpolig angelegter Sekundärwicklung zwei hintereinander geschaltete Glühlampen zwischen den später zu verbindenden Punkten nicht aufleuchten.

Die Technik verwendet Transformatoren auch zu Meßzwecken, indem z. B. für einen Strommesser nach Fig. 452 und für einen Spannungsmesser nach Fig. 453 verfahren wird.

Der Zweck der Einrichtung besteht darin, die hohe Spannung nicht an der Bedienungsseite der Schalttafel auftreten zu lassen.

Unter Hickschen Transformatoren (Autotransformatoren) versteht man Transformatoren nach dem Schema der Fig. 454, die gewöhnlich dazu verwendet werden, von der Gebrauchsspannung (Spannung des Sekundärnetzes) aus zu niedrigeren Spannungen überzugehen. Fig. 454 zeigt z. B. den Fall für die Verwendung zu Bogenlampenzwecken. Es kann jede der drei eingezeichneten Lampen unter Verwendung entsprechender Schalter einzeln brennen oder einzeln ausgeschaltet werden. Die Leistungsaufnahme des Systems ist dabei nicht wesentlich größer, als sie für eine bzw. zwei Bogenlampen erforderlich ist. Beim Anschluß von 3 Bogenlampen liegen die Lampen hintereinander, während der Transformator abgeschaltet ist.

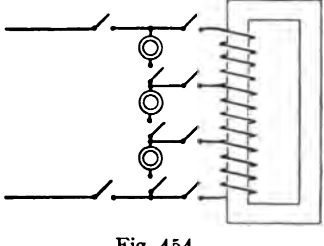


Fig. 454.

§ 119. Der Synchronmotor und das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen.

Weisen Wechselstrommaschinen eine solche Umdrehung auf, daß in jedem Augenblick an den Maschinen die Stellung der Erregerpole zu den Ankerspulen dieselbe ist, so heißen die Bewegungen synchron.

Zwei synchron laufende Wechselstrommaschinen mögen so beschaffen und so erregt sein, daß man an ihren Ankern in jedem Augenblick die gleiche Spannung hat. Man kann dann die Klemmen der beiden Maschinen, die für einen Augenblick gleichzeitig positiv, und die beiden, die in demselben Augenblick negativ sind, vereinigen, so sendet keine der beiden Maschinen einen Strom in die andere. Die Spannungen der beiden Maschinen halten sich in jedem Augenblick das Gleichgewicht. Die Schaltung der beiden Maschinen und eine Stellung der beiden Erregersterne, wie sie dieser Betrachtung zugrunde liegt, ist für das Beispiel von zwei vierpoligen Maschinen durch Fig. 455 schematisch ausgedrückt.

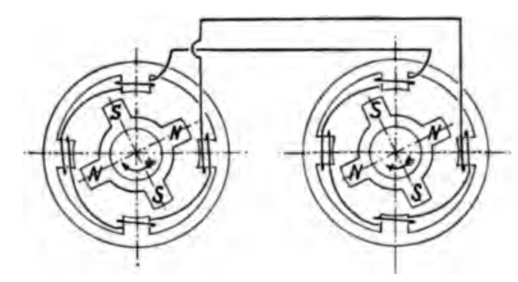


Fig. 455.

Decken sich die Spannungskurven zweier Maschinen zeitlich nicht, so treten Ströme von der einen auf die andere, oder umgekehrt, über. Durch diese Ströme werden Kraftwirkungen (nach der Regel der linken Hand) von der einen auf die andere Maschine (oder umgekehrt) ausgeübt.

Die Stromlosigkeit in dem oben genannten Falle kann auf zweierlei Weise gestört werden:

1. Die Ströme entstehen bei Phasengleichheit dadurch, daß die eine Maschine in positivem oder negativem Sinne stets höhere Werte der elektromotorischen Kräfte aufweist, als die andere. Für diese Ströme ist in jedem Augenblick die eine Maschine Erzeuger, die andere Verbraucher. Die Ströme suchen die mit niedrigerer EMK laufende Maschine im Sinne des Umlaufes zu drehen und bestehen aus reinem Wattstrome bei der vereinfachenden Annahme von Selbstinduktionslosigkeit. Die Induktionsspannung der getriebenen Maschine bildet eine EMGK gegen die angelegte Spannung. Ihr Produkt mit dem Strome bildet eine auf den beweglichen Teil übertragene Leistung, die stets in positivem Sinne auftritt.
2. Die Ströme entstehen unter Voraussetzung gleicher Kurvenformen bei gleichen Scheitelwerten der elektromotorischen Kräfte beider Maschinen durch eine gegenseitige Verschiebung in der Phase. Für diese Ströme ist bald die eine, bald die andere Maschine Erzeuger und Verbraucher. Die Kraftwirkungen dieser Ströme suchen in der einen Viertelperiode die Bewegung einer bestimmten Maschine zu hemmen, in der nächsten Viertelperiode im gleichen Maße zu beschleunigen. Diese Wirkung gilt wechsel-

seitig von der einen Maschine auf die andere. In Summa ist diese Wirkung im Verlauf der Periode gleich Null. Diese Ströme sind wattlos.

Im allgemeinen treten die Fälle 1 und 2 gemeinsam auf, und der Strom, der von der einen auf die andere Maschine übertritt, ist in eine Wattkomponente und eine wattlose Komponente zu zerlegen. Bei geringer Verschiebung ist der treibende Impuls größer als der hemmende.

Denken wir uns nun von einer der beiden in Fig. 455 angedeuteten Maschinen im Zustande der Stromlosigkeit des Kreises die äußere Antriebskraft weggenommen, so muß zur Fortsetzung der Bewegung das nötige Drehmoment vom Strome aufgebracht werden. Diejenige Maschine, die getrieben werden soll, bleibt mit ihren Polen zunächst etwas gegen die treibende Maschine zurück, wofür Fig. 456 das Sinnbild sein soll. Mit diesem Zurückbleiben bekommen die Kraftlinien eine tangentiale Komponente; der dadurch zurückgehende Kraftfluß hat eine Verringerung der Induktionsspannung und das Aufkommen eines Ankerstromes zur Folge. Die Ankeramperewindungen bilden Gegenamperewindungen zu denjenigen des Erregersternes. Auch die Gegenamperewindungen wirken schwächend auf den Kraftfluß und die Induktionsspannung und begünstigen die Stromaufnahme des Ankers, die bis zu dem Punkte sich vermehrt, wo das vom Strome zugeführte Drehmoment gleich dem für die Fortsetzung der Bewegung erforderlichen Drehmoment ist. Der Motor muß bei dem Zurückbleiben der Pole stets mit derselben Umgangszahl laufen. Bei zunehmender Belastung nimmt nur der Abstand zwischen Ankerpol und Erregerpol zu.

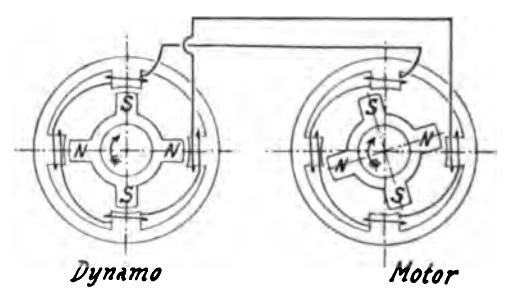


Fig. 456.

Eine solche Verschiebung der Pole im Felde bringt nun zugleich auch eine unnötige Vergrößerung des Stromes mit einer wattlosen nachbleibenden Komponente mit sich; der Motor arbeitet erst günstig, wenn die Erregerpole auch beim belasteten Motor zu den Ankerpolen zurückgeholt werden. Das läßt sich erreichen, indem der Erregerstrom auf der Motorseite verstärkt wird. Bei Übererregung kann auch der Magnetpol dem Ankerpol vorauseilen. Der Strom besitzt in diesem Falle eine der Spannung vorauseilende wattlose Komponente. Man erkennt die richtige Regelung des Erregerstromes auf der Motorseite daran, daß der bei der betreffenden Belastung aufgenommene Wechselstrom des Motors einen Geringstwert aufweist. In diesem Falle wird das Motorfeld nur durch die Rückwirkung des Ankerstromes auf den nötigen gegen den Leerlauf verringerten Wert herabgedrückt.

Sobald die Umlaufszahl des Motors geringer wird, als es dem Synchronismus entspricht, findet keine regelmäßige Kraftwirkung zwischen dem Anker und den Erregerpolen mehr statt, der Motor bleibt stehen, er fällt aus der Phase; starke Ströme fließen regellos herüber und hinüber, wodurch die Sicherungen des praktisch angeschlossenen Motors in Tätigkeit treten. Durch plötzliche Stöße, die der Motor zu überwinden hat, kann er leicht aus dem Synchronismus herausgebracht werden. Das Anschließen der Synchronmotoren ist nur nach dem in der zweiten Hälfte dieses Paragraphen angedeuteten Verfahren möglich.

Die Umständlichkeit des Anlassens und die Unfähigkeit Belastungsstöße zu vertragen, geben den Synchronmotoren nur ein beschränktes Anwendungsgebiet. Sie werden meistens in elektrischen Anlagen dazu verwendet, Wechselstrom in Gleichstrom umzuformen. Die dazu gehörigen Maschinen (Umformer, Konverter) sind gewöhnlich im Grundsatz dasselbe wie Synchronmotoren, die mit einer Gleichstrommaschine unter Verwendung eines Ankers zusammengestellt sind. Bei getrennten Ankern heißen sie Motorgeneratoren.

Der Grund für die Verwendung der Synchronmotoren in diesem Falle ist der, daß dieser Motor mit annähernd so hohem Wirkungsgrad arbeitet, wie man ihn bei Gleichstrommotoren derselben Leistung erreicht. Im späteren werden andere Wechselstrommotoren behandelt werden, deren Betrieb bequemer, deren Wirkungsgrad aber niedriger ist.

Zum Anschließen eines Synchronmotors bedient man sich einer Antriebsmaschine, die nur den Leerlauf des Motors zu überwinden hat. Sie besteht meistens aus einem Elektromotor, und zwar kann dazu bei Motorgeneratoren und Umformern die von Akkumulatoren betriebene Gleichstrommaschine verwendet werden, oder man benutzt dazu kleinere Wechselstrommotoren der später zu behandelnden Art. Alles, was im folgenden von dem Parallelschalten der Wechselstrommaschinen gesagt ist, gilt sinngemäß auch von dem Anschließen eines Synchronmotors.

Parallel zu schaltende Wechselstrommaschinen müssen synchron laufen; sind Wechselstrommaschinen parallel geschaltet, so stellt sich nach allem, was über den Synchronmotor gesagt ist, weiterhin der Synchronismus von selbst ein: Eine Maschine, deren zugeführte Leistung in einem Augenblick zu groß ist, überträgt einen Teil ihrer Leistung nach den beim Synchronmotor behandelten Vorgängen auf die übrigen Maschinen, deren Antriebsmaschine dadurch entlastet wird. So wird eine gegenseitige Zwangläufigkeit parallelgeschalteter Maschinen erreicht, wobei sich der Leistungsanteil jeder Maschine nur nach der von der Antriebsmaschine zugeführten Leistung, nicht aber nach der Höhe der Erregung richtet.

Für das Parallelschalten selbst gilt folgendes:

Zu dem Parallelschalten ist es erforderlich, daß die Geschwindig-

keit der Betriebsmaschine in sehr feiner Weise geändert werden kann. Man erreicht das entweder durch Drosselung des Dampfes, durch feine Verstellungen des Regulators oder durch elektrische bzw. Wirbelstrombremsung, bei elektrisch betriebenen Andrehvorrichtungen von Synchronmotoren durch Widerstände.

In Fig. 457 sei Maschine I, von der nur der Anker schematisch angedeutet ist, bereits im Betriebe und an die Sammelschienen s_1 und s_2 angeschlossen. Maschine II soll angeschlossen werden. Zu dem Zweck wird sie zunächst in Gang gesetzt und erregt, so daß ihre Spannung bei annähernd richtiger Umlaufszahl ungefähr gleich der Netzspannung ist. Um nun den Synchronismus zu erkennen, bedient man sich der Phasenlampen, die der einfachsten Möglichkeit entsprechend (in Fig. 457 l_1 und l_2 an Maschine II) zwischen den Kontakten des Maschinenhebels liegen. Sind beide Spannungen, die

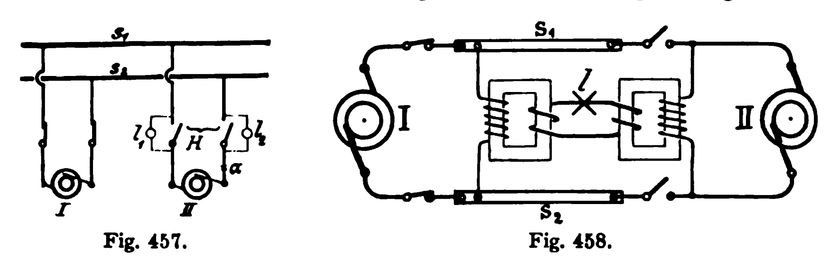


Fig. 457. Fig. 458.

des Netzes und der Maschine, eine Zeitlang in jedem Augenblick entgegengesetzt, so leuchten die Lampen hell auf. Decken sich beide Phasen, so ist keine Spannung zwischen den Kontakten vorhanden, und die Lampen bleiben dunkel. Hat die anzuschließende Maschine ungefähr die richtige Umlaufszahl, so werden die Phasenlampen abwechselnd hell und dunkel, und zwar dauert die Aufeinanderfolge immer länger, je mehr die Umlaufszahl sich der richtigen nähert. Man regelt so lange die Geschwindigkeit der anzuschaltenden Maschine, bis der Takt der Phasenlampen möglichst langsam geworden ist, und legt den Ausschalter ein, wenn die Lampen am dunkelsten sind.

Da die Wechselstromgeneratoren meistens Hochspannung in der Nähe von 5000 Volt führen, verwendet man für die Phasenlampen kleine Transformatoren, wodurch das Schema Fig. 458 entsteht. Diese Schaltung läßt die Möglichkeit zu, die beiden Sekundärwicklungen der Transformatoren entweder hintereinander oder gegeneinander zu schalten, so daß auch der Augenblick, an dem einzuschalten ist, an dem hellen Aufleuchten der Phasenlampen kenntlich gemacht werden kann; für letzteren Fall ist Fig. 458 gezeichnet, in der l die Phasenlampe bedeutet.

Letztere Anordnung ist die übliche, da der Augenblick des hellsten Aufleuchtens schärfer mit dem richtigen Augenblick der Phasengleichheit zusammenfällt, als die größte Dunkelheit der Lampen, die sich über ein großes Bereich der Phasenverschiebung erstreckt.

§ 120. Dreiphasenstrom (Drehstrom).

Die Bestrebungen von dem gewöhnlichen, bisher behandelten Wechselstrom, der als einphasig bezeichnet wird, abzugehen, ergeben sich daraus, daß mit ihm die Frage der Arbeitsübertragung eine Zeitlang nicht gelöst war und für alle Fälle auch noch nicht gelöst ist, während bei Abgabe von Licht auch bei Mehrphasenstrom jede Phase einzeln verwendet wird. Den Kernpunkt der folgenden Betrachtungen bildet daher, die Motoren für Mehrphasenstrom in ihrer Wirkungsweise zu erklären.

A. Der Begriff des Wanderfeldes und des Drehfeldes.

Unter einem Wanderfeld versteht man ein magnetisches Feld, das im Raume eine gewisse Geschwindigkeit normal zu seiner Kraftlinienrichtung besitzt. Ein einfacher Fall der Entstehung eines Wanderfeldes wäre der, daß ein Magnet durch den Raum bewegt wird, so wie es Fig. 459 andeutet. Der dort abgebildete Hufeisenmagnet soll in Richtung des Pfeiles dicht über eine Eisenplatte bewegt werden. Unter seinen Polen entsteht dann ein mit der Bewegung des Magneten fortschreitendes Magnetfeld.

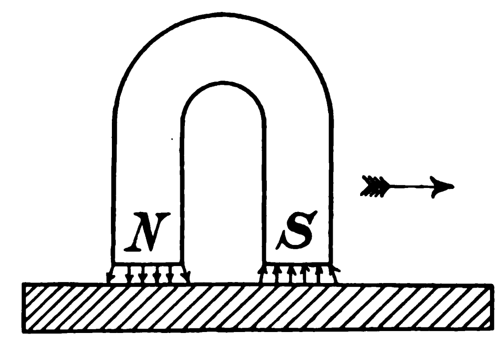


Fig. 459.

Ein Fall, wie er in der Technik häufiger vorkommt, ist der, daß ein Magnetfeld eine Kreisbewegung ausführt, wobei die Kraftlinien im wesentlichen radial verlaufen. Das ist z. B. der Fall, wenn nach Fig. 460 die dort gezeichneten Magnetpole um einen zylindrischen Eisenkörper umlaufen. Ein magnetisches Feld, das eine Bewegung in diesem Sinne ausführt, bezeichnet man in der Technik als ein Drehfeld.

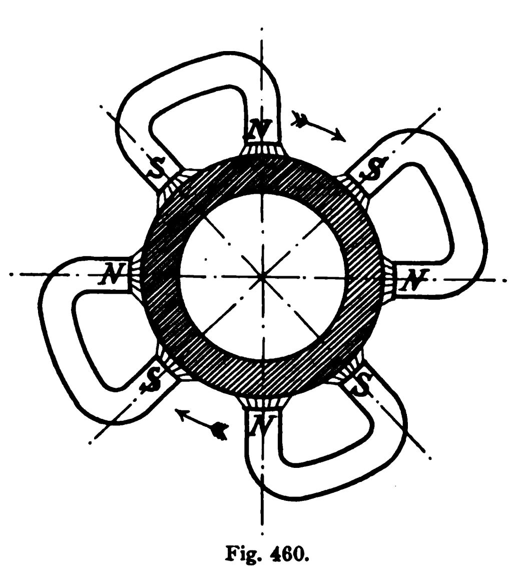


Fig. 460.

Als ein Drehfeld kann das Feld eines Erregersternes bezeichnet werden, der sich innerhalb des feststehenden Ankers einer Wechselstrommaschine dreht. Die Anordnungen nach Figg. 459 und 460 dienen nur zur Erklärung der Begriffe. Die Drehfelder, von denen später die Rede sein wird, werden durch elektrische Ströme erzeugt.

B. Ein geschlossener Leiter im Wanderfeld.

Ein Kupferdraht *a b c d* in Fig. 461 bilde eine in sich geschlossene Schleife. Wird diese Schleife durch das magnetische Feld der vorläufig noch feststehend gedachten Polreihe der Fig. 461 hindurchgezogen, so wird in der Schleife vor jedem Polpaar ein Strom induziert, und infolgedessen eine Kraftwirkung ausgeübt, die nach § 67, 9. Versuch, der Bewegung der Schleife entgegenstrebt. Nach der Regel der rechten

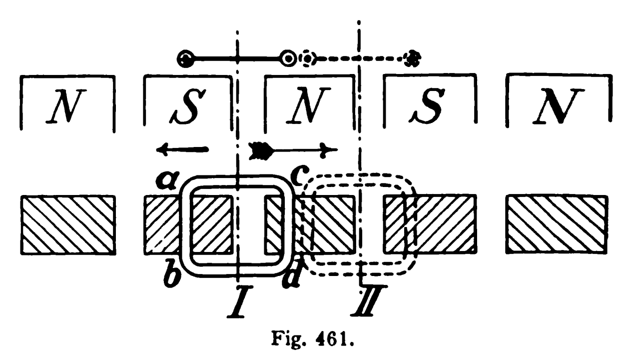


Fig. 461.

Hand fließt bei der durch den Federpfeil angegebenen Bewegungsrichtung der Strom über dem Nordpol auf den Beschauer zu. Die durch den induzierten Strom erzeugte Kraftwirkung ergibt sich nach der Regel der linken Hand über allen Polpaaren in Richtung des ungefiederten Pfeiles.

Hält man nun die Schleife *a b c d* fest, und bewegt man die Reihe der Magnetpole in entgegengesetzter Richtung gegenüber der vorherigen Bewegung der Schleife, so werden die unter den Polen liegenden Drähte *a b* und *c d* genau in derselben Weise von Kraftlinien geschnitten, wie im vorigen Fall; daher wird auch im Kupfer ein Strom von derselben Richtung induziert und auf die Schleife eine Kraft ausgeübt in derselben Richtung wie im vorigen Falle.

1. Ergebnis. Bewegt man einen Magnetkranz mit abwechselnden Polen über eine in sich geschlossene Schleife, deren wirksame Leiter um Polabstand voneinander entfernt sind, so wird auf diese Schleife eine Kraft in Richtung der Magnetpolbewegung ausgeübt.

Denken wir uns weiterhin nach Fig. 462 eine größere Anzahl in sich geschlosssener Spulen rund um einen zunächst feststehenden zylindrischen Eisenkörper gelegt und an ihm befestigt, so werden bei der Drehung des Magnetkranzes die Drähte sämtlicher Schleifen von

Kraftlinien geschnitten. Jede einzelne Schleife trägt mit dem in ihr induzierten Strom zu einer Kraftwirkung bei, die den inneren zylinderischen Teil der Feldbewegung nachzudrehen sucht.

Dies ist der Grundgedanke zu den später näher zu betrachtenden Drehfeldmotoren. Wird nun der zylindrische Teil, der die in sich geschlossene Wicklung trägt, und der den Namen Läufer führt, losgelassen, so daß er sich um seine Achse drehen kann, so wird er durch die induzierten Ströme in Drehung versetzt. Seine Geschwindigkeit kann dabei nicht größer werden, als die Umfangsgeschwindigkeit des Feldes, weil bei gleicher Geschwindigkeit die Wicklung nicht mehr von Kraftlinien geschnitten wird, und weil dann auch der Induktionsstrom und somit auch die Kraftwirkung aufhört.

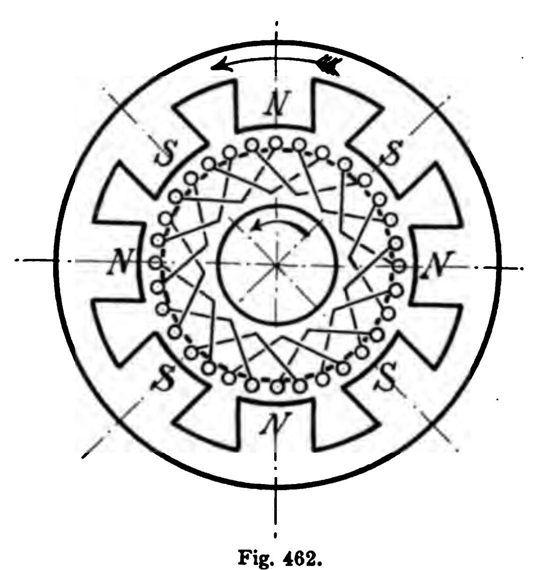


Fig. 462.

Hat der Läufer Kräfte zu überwinden, so stellt sich seine Geschwindigkeit geringer ein als die Feldgeschwindigkeit. Ein Beharrungszustand ist dann erreicht, wenn der Läufer um so viel nachbleibt, daß die Schnittgeschwindigkeit ausreicht einen Strom zu induzieren, der zusammen mit dem Felde das nötige Drehmoment herstellt.

2. Ergebnis. Befindet sich ein zylindrischer Eisenkörper, dessen Umfang mit einer Anzahl von in sich geschlossenen Schleifen versehen ist, in einem konstanten magnetischen Felde, das sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit dreht, so folgt der Eisenkörper dieser Drehung, und zwar bleibt er mit seiner Umlaufszahl um so mehr hinter der Feldgeschwindigkeit zurück, je größer das zu überwindende Drehmoment ist.

C. Die Übertragung eines Drehfeldes durch drei Wechselströme.

Fig. 463 stellt das Schema eines Teiles einer Wechselstrommaschine dar, bei der zwischen je zwei auf Nutenmitte stehenden Erregerpolen überall zwei weitere Nuten angeordnet sind. In den Nuten liegen Ankerspulen, die jedesmal zwei Nuten überspringen. Die in Fig. 463 in gleicher Höhe liegenden Spulen sind hintereinander geschaltet und befolgen ein Schema nach Fig. 394. Es sind somit in einem Anker drei Wechselstrommaschinen vereinigt, die von einem Erregerkranz

magnetisiert werden. Die Wicklung in diesem Sinne ist fortgesetzt zu denken, bis ein Umgang um das Ankereisen vollständig ist. Die sechs Klemmen dieser drei Ankerwicklungen sind in der Grundrißdarstellung von Fig. 463 mit 1 und 1', 2 und 2', 3 und 3' bezeichnet.

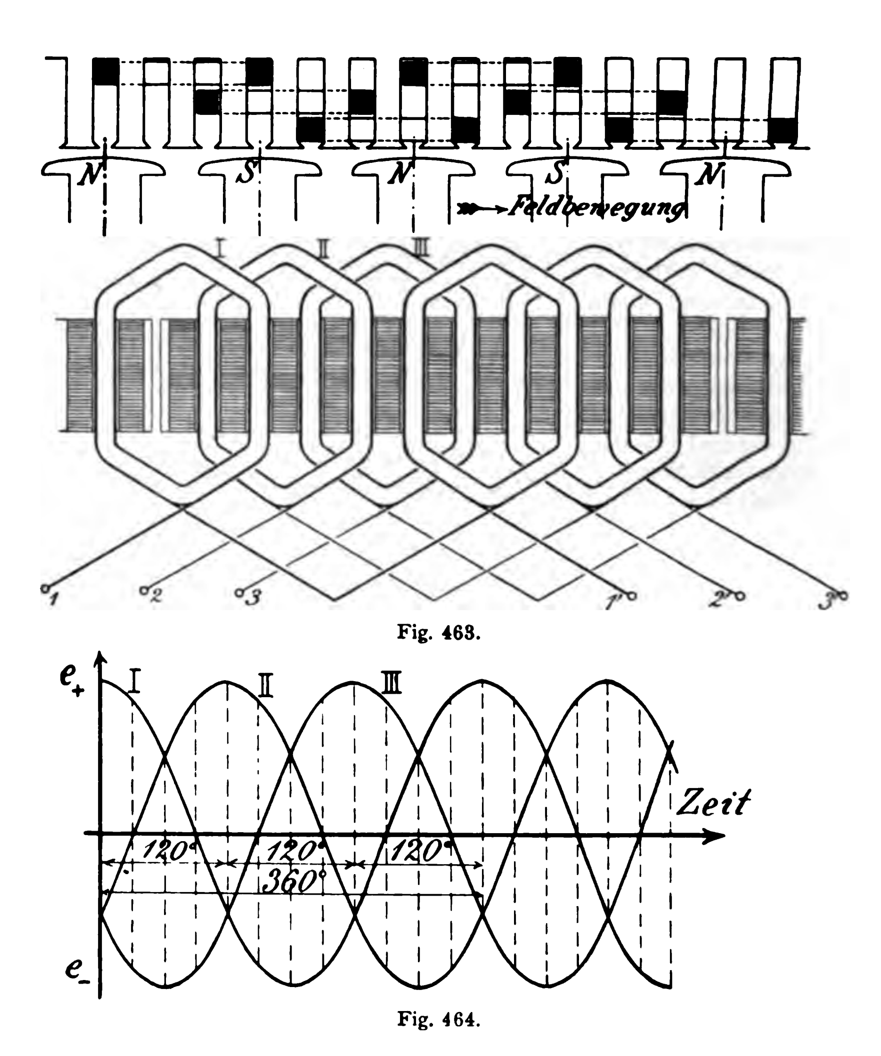


Fig. 463.

Fig. 464.

Jede einzelne der drei Ankerwicklungen bekommt, wenn die Erregerpole an den Ankerspulen vorbeiwandern, zwischen ihren Enden eine wechselnde Spannung. Jede der drei Spannungskurven hat zu einer anderen Zeit ihren Scheitelwert. Fig. 464 enthält unter dem

Schema der Ankerwicklung die Spannungskurven der drei Wicklungen. Die Kurve I bezeichnet, von der wagerechten Achse aus gerechnet, die Spannung zwischen Klemme 1 und 1′, II diejenige zwischen 2 und 2′ und III diejenige zwischen 3 und 3′. Eine senkrechte Linie durch diese Kurven gibt an jeder Stelle gleichzeitige Werte an, und zwar gelten die Werte bei der angegebenen Richtung der Feldbewegung gemäß der Stellung der in Fig. 463 am Erregernordpol dick hervorgehobenen Mittellinie; dabei bedeutet das Vorzeichen die Polarität der Klemmen 1, 2 und 3. Die drei Spannungsphasen der einzelnen Wicklungen sind um gleiche Zwischenräume verschoben. Betrachtet man wiederum die Zeit einer ganzen Stromperiode als einen Winkel von 360°, so beträgt die gegenseitige Verschiebung der drei Phasen jedesmal 120°.

Es sei nun an den Anker des in Fig. 463 angedeuteten Generators eine zweite, vollständig gleiche Einrichtung angeschlossen, und zwar

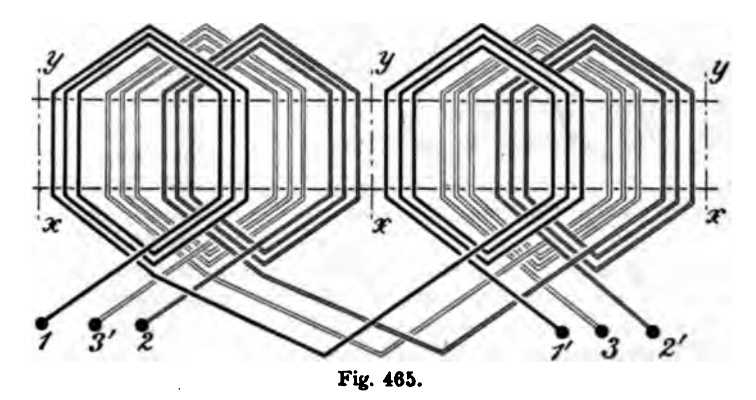


Fig. 465.

so, daß an der zweimal gezeichnet zu denkenden Fig. 463 sämtliche gleich bezeichneten Klemmen miteinander verbunden sind. Das Spulensystem der zweiten Einrichtung, die zu Motorzwecken benutzt werden soll, heißt samt dem zugehörigen Eisen der Ständer des Motors.

Von dem Generatoranker aus fließen nun um $^1/_3$ Periode zueinander verschobene Wechselströme durch die Ständerwicklung. Durch Zusammenwirken der drei Ströme erhält das feststehende Ständereisen wandernde Magnetpole, also wird dadurch in Verbindung mit einem Läufer dasselbe erreicht, als ob eine Reihe von Magnetpolen nach Angabe der Fig. 462 über den Läufer bewegt würde.

Auf dem oben beschriebenen Verfahren der Übertragung eines Wanderfeldes bzw. eines Drehfeldes auf elektrischem Wege in Verbindung mit dem Verhalten des im vorigen Abschnitt angedeuteten Läufers beruht die am meisten verwendete Art der Leistungsübertragung mittels Wechselstromes. Überträgt man das Drehfeld durch drei

Wechselströme, so wie es in diesem Abschnitt behandelt wurde, so bezeichnet man die drei zusammengehörigen Wechselströme mit dem Namen Drehstrom oder Dreiphasenstrom.

Soll bei großen Drehstrommaschinen der Anker bzw. der Ständer teilweise schnell ausgewechselt werden können, so kann man (entsprechend Fig. 429) nach dem Schema der Fig. 465 vorgehen, das Trennstellen des Eisens gemäß den Linien xy zuläßt.

D. Die Anwendung von 3 Leitungsdrähten bei Drehstrom. Dreieck- und Sternschaltung.

Eine an beliebiger Stelle durch das Schaubild eines Dreiphasenstromes (Fig. 466) gezogene senkrechte Linie gibt zu erkennen, daß in jedem Augenblick zwei Phasen in der einen und die übrig bleibende in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden. Der Strom der einen Richtung ist stets größer, als jeder der beiden entgegengesetzten Ströme. In dem Augenblick, wo der Strom einer Phase gleich Null ist, sind die Ströme der beiden übrigen Phasen entgegengesetzt und gleich groß. Es liegt der Gedanke nahe, zu erwägen, ob nicht jedesmal zwei Phasen als Rückleitung für die dritte benutzt werden können. Man würde dann zu der Übertragung der drei Wechselströme nur drei Drähte brauchen.

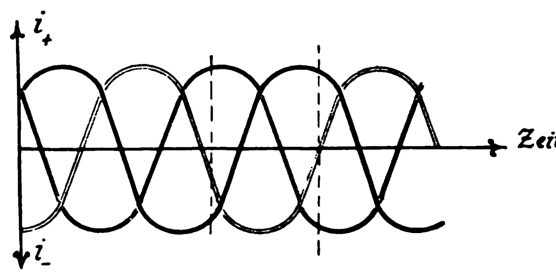


Fig. 466.

In Fig. 467 sind die bereits bekannten zwei Kreise, die eine Sinuskurve im Polarbild darstellen, gezeichnet. Läßt man in diesem Diagramm drei Fahrstrahlen umlaufen, die um 120° zueinander versetzt sind, so geben diese Linien OA, OB und OC jedesmal für den betrachteten Augenblick α zusammengehörige Werte der Stromstärken an. Läßt sich beweisen, daß die algebraische Summe der drei Linien OA, OB und OC für jeden Winkel gleich Null ist, so ist die Übertragung durch drei Drähte möglich.

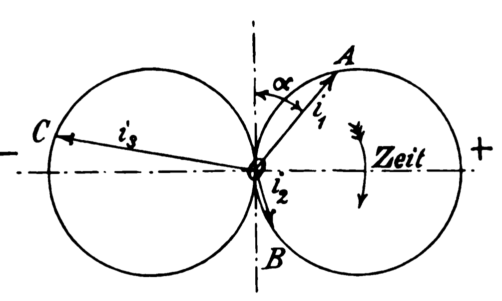


Fig. 467.

Wir nehmen mit Fig. 467 an, die augenblickliche Stromstärke i_1 bei Phase 1 stünde unter dem Winkel α, dann ergibt sich für Phase 2

eine gleichzeitige Stromstärke i_2 in dem Winkel $\alpha + 120^0$ und für Phase 3 eine solche i_3, die dem Winkel $\alpha + 240^0$ entspricht.

Es ist, wenn $\hat{i}$ den Scheitelwert des Stromes bedeutet:

$$i_1 = OA = \hat{i} \cdot \sin\alpha \tag{61}$$

$$i_2 = OB = \hat{i} \cdot \sin(\alpha + 120^0) = \hat{i} \sin\alpha \cos 120^0 + \hat{i} \cos\alpha \sin 120^0 \tag{62}$$

$$i_3 = OC = \hat{i} \cdot \sin(\alpha + 240^0) = \hat{i} \sin\alpha \cos 240^0 + \hat{i} \cos\alpha \sin 240^0. \tag{63}$$

Darin ist einzusetzen:

$$\cos 120^0 = -\sin 30^0 = -0{,}5$$
$$\sin 120^0 = +\cos 30^0 = +0{,}86603$$
$$\cos 240^0 = -\sin 30^0 = -0{,}5$$
$$\sin 240^0 = -\cos 30^0 = -0{,}86603.$$

Daraus folgt:

$$OA = +\hat{i} \sin\alpha$$
$$OB = -0{,}5\,\hat{i} \sin\alpha + 0{,}86603\,\hat{i} \cos\alpha$$
$$OC = -0{,}5\,\hat{i} \sin\alpha - 0{,}86603\,\hat{i} \cos\alpha$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = OA + OB + OC = 0 \tag{64}$$

Ergebnis. Die algebraische Summe der drei Ströme in den einzelnen Phasen des Drehstromes ist in jedem Augenblick gleich Null, daher genügen drei Drähte zur Übertragung eines Drehfeldes.

Obiger Beweis gilt für sinusförmigen Verlauf. Bei Abweichungen von der Sinusform wird die algebraische Summe $i_1 + i_2 + i_3$ durch Anwendung von drei Drähten in jedem Falle gleich Null. Die An-

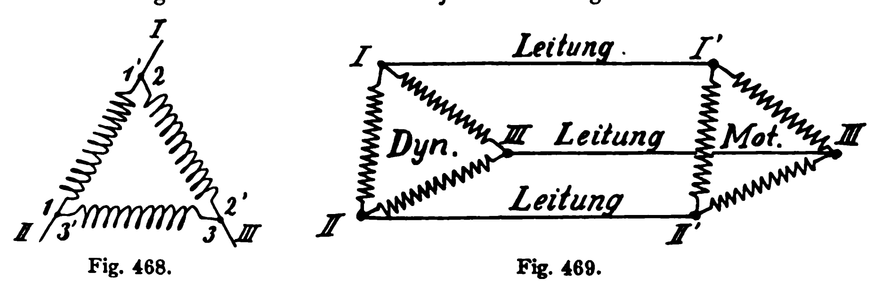


Fig. 468. Fig. 469.

wendung von drei Drähten wird möglich entweder mit der Dreieckschaltung oder mit der Sternschaltung.

Wir denken uns zunächst mit den Bezeichnungen der früheren Abbildung Fig. 468 verbunden 1' mit 2 und 2' mit 3 und 3' mit 1. Ist die ganze Wicklung 1—1' in Fig. 468 durch eine Windungslinie ausgedrückt, ebenso 2—2' und 3—3', so gleicht diese Schaltung im Schema einem Dreieck, daher führt sie den Namen Dreieckschaltung.

In diesem Dreieck fließt beim Umlauf des Erregerkranzes zunächst kein Strom, denn von den Spannungen der einzelnen Phasen gilt dasselbe, was in dem vorigen Abschnitt von den Strömen gesagt wurde, sie ergänzen sich gegenseitig zu Null, d. h. die Spannungen der 2. und 3. Phase zusammen halten derjenigen der ersten das Gleichgewicht usw. fort. Von den Verbindungsstellen I, II und III aus ist der Strom abnehmbar, und von diesen drei Punkten gehen die drei Leitungen aus, durch die ein Strom nach den im vorigen Abschnitt behandelten Gesetzen fließen kann. Bei dem Motor sind nun die drei entsprechenden Wicklungen 1—1′, 2—2′ und 3—3′ genau so geschaltet wie bei dem Generator, so daß eine Drehstromübertragung in Dreieckschaltung durch das Schema Fig. 469 ausgedrückt ist.

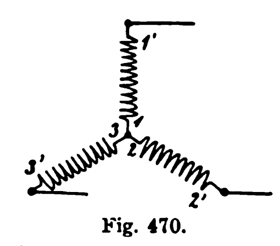


Fig. 470.

In Fig. 463 können auch die drei Punkte 1, 2 und 3 miteinander verbunden werden. Die drei übrig bleibenden Klemmen der Wicklung bilden dann ebenfalls Punkte, von denen die Leitungen ausgehen können.

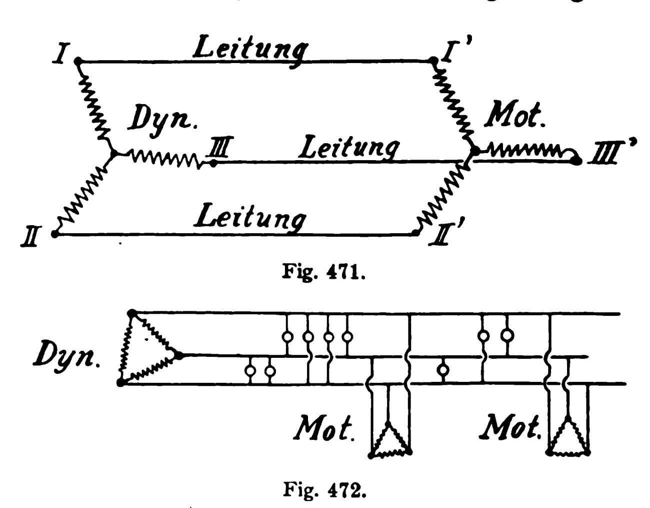


Fig. 471.

Fig. 472.

Schematisch ist diese Schaltung durch Fig. 470 ausgedrückt; die Schaltung führt den Namen Sternschaltung. Der Punkt, an dem die drei Wicklungen zusammenstoßen, heißt der Nullpunkt. Die Verbindung eines Motors mit einem Generator in Sternschaltung zeigt Fig. 471.

Kreuzt man in Figg. 469 oder 471 zwei Leitungsdrähte, so daß etwa *I* mit *II′* und *I′* mit *II* verbunden wird, so wandert das Feld an dem Motor in entgegengesetzter Richtung gegenüber dem ersten Fall. Zur Umkehr der Drehrichtung eines Drehstrommotors hat man daher nur zwei Zuleitungen zu vertauschen.

Ist eine Drehstromanlage nicht allein zur Kraftübertragung, sondern auch für Beleuchtungszwecke zu verwenden, so kann man die Lampen nach dem Schema der Fig. 472 unmittelbar zwischen zwei Außenleiter legen. Man verteilt dann die Lampen auf alle drei Phasen möglichst gleichmäßig, so daß die einzelnen Phasen annähernd gleich belastet sind. Das der Fig. 472 entsprechende Schema gilt auch, wenn der Generator oder die Motoren Sternschaltung besitzen. Eine andere, für die Beleuchtung öfters angewendete Schaltung zeigt Fig. 473, bei der die Lampen zwischen den Außenleitern und einem Nullleiter geschaltet sind. Auch hier ist die Belastung möglichst gleichmäßig auf alle Phasen zu verteilen. Für die Beleuchtung ist hier jede Phase

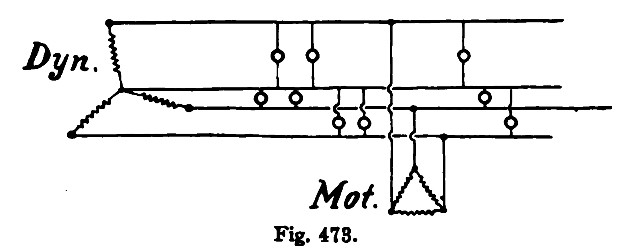


Fig. 473.

des Drehstromgenerators eine für sich allein bestehen könnende einphasige Wechselstrommaschine, während nur für die Motoren alle drei Phasen zusammenwirken. Die zuletzt beschriebene Schaltung hat den Vorzug, daß die Lampen, wie die folgenden Betrachtungen zeigen, an niedrigerer Spannung liegen, als die Motoren. Man kann durch diese Anordnung an Leitungskupfer sparen, da die Abnahme größerer Leistungen nun auch bei höherer Spannung erfolgt.

Dreiphasenstrom, der nur durch drei Drähte fortgeleitet wird, heißt verketteter Dreiphasenstrom. Die Spannung zwischen den Außenleitern im Gegensatz zur Spannung vom Nullpunkt aus gerechnet bezeichnet man als verkettete Spannung.

E. Stromstärke, Spannung und Leistung des verketteten Dreiphasenstromes.

Bedeutet e_0 den Scheitelwert der Spannung einer Phase, gemessen zwischen dem Nullpunkt und einem Außenleiter, so ist für diese Phase unter Voraussetzung des sinusförmigen Verlaufes nach Gleichung 2 und mit den dort angewandten Bezeichnungen der Augenblickswert beim Winkel α

$$e_a = e_{\wedge} \sin \alpha \,. \tag{2}$$

Der ebenfalls zwischen Nullpunkt und Außenleiter auftretende Wert der Spannung für die zeitlich nächstfolgende Phase ist in demselben Augenblick

$$e'_a = e_{\wedge} \sin (\alpha - 120^0) = e_{\wedge} [\sin \alpha \cos 120^0 - \cos \alpha \sin 120^0] \,. \tag{65}$$

Daraus folgt die verkettete Spannung:

$$\left.\begin{aligned} e_a - e'_a &= e_{\wedge} \sin\alpha - e_{\wedge} \sin\alpha \cos 120^0 + e_{\wedge} \cos\alpha \sin 120^0, \\ &= e_{\wedge} [\sin\alpha (1 - \cos 120^0) + \cos\alpha \sin 120^0], \\ &= e_{\wedge} [\sin\alpha (1 + 0{,}5) + \cos\alpha \cdot 0{,}86603]. \end{aligned}\right\} \quad (66)$$

Werden in einem rechtwinkeligen Dreieck, das nach Fig. 474 den Winkel α enthält, die Katheten a und b benannt, so ist die Hypotenuse

$$c = a \sin\alpha + b \cos\alpha = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (67)$$

Daraus folgt:

Ist man von dem Winkel α unabhängig, so kann man den Ausdruck $a \sin\alpha + b \cos\alpha$ auch ersetzen durch den Ausdruck $\sqrt{a^2 + b^2}$.

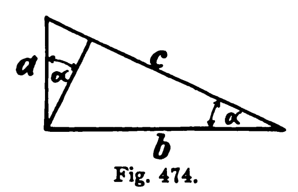


Fig. 474.

Bei der Rechnung mit Effektivwerten an Stelle der Augenblickswerte ist man vom zeitlichen Winkel α unabhängig und kann daher obige Umformung vornehmen. Bedeutet E die effektive Spannung an den einzelnen Phasen vom Nullpunkt aus gerechnet, und E' die effektive verkettete Spannung, so gilt daher:

$$E' = E\sqrt{1{,}5^2 + 0{,}86603^2} = E\sqrt{3}. \quad (68)$$

Bei Drehstrom-Sternschaltung beträgt die verkettete Spannung das $\sqrt{3}$-fache der Spannung einer einzelnen Phase vom Nullpunkt aus gemessen, während die Stromstärke in Ankerwicklung und Leitung die gleiche ist.

Bei Dreieckschaltung liegt an den Leitungen die Spannung in der Höhe, wie sie unmittelbar an den Klemmen der Ankerwicklung jeder einzelnen Phase auftritt. Hier fließen aber in einer Leitung die Ströme aus zwei Phasen zusammen. Was bei der Sternschaltung von den Spannungen gesagt wurde, gilt entsprechend bei Dreieckschaltung in bezug auf die Stromstärken:

Bei einer Drehstrom-Dreieckschaltung beträgt die Stromstärke I in der Leitung das $\sqrt{3}$-fache der Stromstärke I_P, die in der Wicklung einer einzelnen Phase auftritt:

$$I = I_P \cdot \sqrt{3}. \quad (69)$$

Die Leistung werde zunächst mit Ausgang von der Sternschaltung bestimmt unter der Voraussetzung, daß selbstinduktions- und kapazitätslose Stromverbraucher (Glühlampen) vorliegen.

Ist E die effektive Spannung zwischen dem Nullpunkt und jedem der drei Außenleiter und bedeutet I die effektive Stromstärke in jedem der drei Außenleiter bei gleicher Belastung der drei Phasen, so ist

die Leistung des ganzen Systems gleich der Summe der Leistungen der drei einzelnen Phasen:

$$L = 3\,E\,I. \tag{70}$$

Rechnet man mit der verketteten Spannung E', so entsteht für die Leistung aller drei Phasen zusammen mit Gleichung 68 der Ausdruck

$$L = 3 \cdot \frac{E'}{\sqrt{3}}\,I = E'\,I \cdot \sqrt{3}\,. \tag{71}$$

Für die Dreieckschaltung entspricht der Gleichung 70 mit obigen Bezeichnungen

$$L = 3 \cdot E' \cdot I_P, \tag{72}$$

woraus mit Gleichung 69 sich ergibt

$$L = 3 \cdot E' \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} = E' \cdot I \cdot \sqrt{3}\,. \tag{73}$$

Das Ergebnis der Gleichungen 71 und 73 ist dasselbe, es gilt daher der Lehrsatz:

Bei selbstinduktionsloser und phasengleicher Belastung ist sowohl bei Stern-, als auch bei Dreieckschaltung die zwischen je zwei Leitungen auftretende Effektivspannung mit dem in je einer Leitung fließenden Effektivstrom und mit $\sqrt{3}$ zu multiplizieren, damit die effektive Leistung des ganzen dreiphasigen Systemes erhalten wird.

Die Leistung bei induktiver Belastung (Transformatoren, Motoren) wird bestimmt unter Ausgang von der für Sternschaltung allgemein gültigen Gleichung der augenblicklichen Leistung

$$l = e_1\,i_1 + e_2\,i_2 + e_3\,i_3\,, \tag{74}$$

wobei e_1, e_2 und e_3 gleichzeitige Augenblickswerte der Spannung an den drei Phasen vom Nullpunkt aus bedeuten, während i_1, i_2 und i_3 die zu demselben Augenblick gehörigen Stromstärken der drei Phasen sein sollen. Addiert man zu Gleichung 74 beiderseits die Werte $e_1\,i_2 + e_1\,i_3$, so wird daraus:

$$l = e_1\,(i_1 + i_2 + i_3) - e_1\,i_2 - e_1\,i_3 + e_2\,i_2 + e_3\,i_3\,. \tag{75}$$

Für verketteten Dreiphasenstrom gilt in allen Fällen, auch ohne die Annahme sinusförmigen Verlaufes, daß in jedem Augenblick

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \tag{64}$$

ist. Daher gilt für die Leistung in jedem Augenblick:

$$l = i_2\,(e_2 - e_1) + i_3\,(e_3 - e_1)\,. \tag{76}$$

Die Werte $e_2 - e_1$ und $e_3 - e_1$ sind in einem verketteten System augenblickliche Spannungen zwischen den Leitungen (Fig. 475) 2 und 1, sowie 3 und 1; die Werte i_2 und i_3 augenblickliche Ströme in den

Leitungen 2 und 3. In Fig. 475 sind die drei aus der Bildebene herausragend zu denkenden Außenleiter im Querschnitt dargestellt. Durch den Kreispfeil sei der Drehsinn des Dreiphasenstromes angegeben. Der Sinn der letzten Gleichung ist folgender:

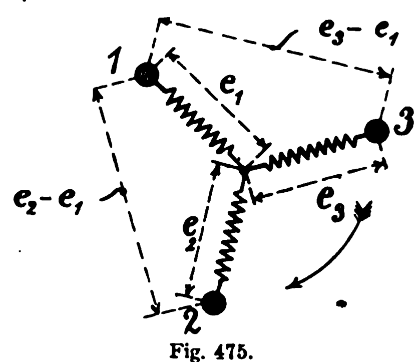


Fig. 475.

Die augenblickliche Leistung einer Drehstromübertragung ist in jedem Fall gleich der Summe derjenigen Augenblicksleistungen, die sich zusammensetzen aus dem Augenblicksstrom zweier Leitungen und aus den Spannungen zwischen diesen Leitern und dem dritten Leiter, dessen Strom nicht in Betracht zu ziehen ist.

Obiger Satz ist von Wichtigkeit für die Messung, denn zwei Leistungsmesser, deren Stromspulen in je einem Leitungsdraht eines verketteten Systemes liegen, und deren Spannungskreise von je einem dieser Leitungsdrähte aus zu dem dritten Leitungsdraht gelegt werden, in dem keine Stromspule liegt (Fig. 476), geben die Effektivwerte aus den den beiden Gliedern von Gleichung 76 entsprechenden Augenblickswerten an. Seien die Effektivwerte, die nach Schema Fig. 476 mit zwei Leistungsmessern gemessen sind, als L_1 und L_2 bezeichnet, so gilt:

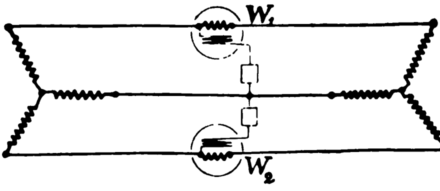


Fig. 476.

$$L = L_1 + L_2 ; \qquad (77)$$

oder in Worten:

Die effektive Leistung bei einer verketteten Drehstromübertragung ist die Summe der mit zwei Leistungsmessern gemessenen Leistungen, wobei die Stromspulen in je einer Zuleitung liegen, während die Spannungsspulen gegen die dritte Zuleitung gerichtet sind.

Die Frage, ob die Verkettung durch Stern- oder Dreieckschaltung erfolgt ist, kommt für dieses Ergebnis nicht in Betracht. Eine der beiden Leistungen L_1 oder L_2 wird negativ, wenn die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung über einen bestimmten Wert hinausgeht. In diesem Falle ist die Summe algebraisch aufzufassen.

F. Berechnung einer Drehstromleitung bei induktionsloser Belastung.

Für den Spannungsverlust einer Drehstromleitung kommen die für Sternschaltung angegebenen Verhältnisse in Frage: Gehen in dem einzelnen Leitungsdraht effektiv e_v Volt verloren, so ist der effektive Spannungsverlust der verketteten Spannung bei gleicher Belastung der Phasen

$$e_v' = e_v \cdot \sqrt{3} ; \qquad (78)$$

mit einem gegebenen Leitungsquerschnitt q, einer gegebenen Stromstärke I und einer gegebenen einfach gemessenen Streckenlänge l läßt sich daher der effektive Spannungsverlust angeben zu

$$e_v' = \frac{l \cdot I \cdot c}{q} \sqrt{3}, \tag{79}$$

wobei c wie früher den spezifischen Widerstand des Leitungsmateriales bedeutet. Für gegebenen Verlust der verketteten Spannung läßt sich der erforderliche Leitungsquerschnitt des einzelnen Drahtes daher auch bestimmen:

$$q = \frac{l \cdot I \cdot c}{e_v'} \sqrt{3} \cdot \tag{80}$$

Beispiel. Es ist von einem Dreiphasennetz aus, dessen verkettete Spannung konstant zu $E_1' = 220$ Volt angenommen sein soll, eine Kupferleitung für $I = 30$ Ampere und $e_v' = 4$ Volt Verlust bei $l = 228$ m einfach gemessener Streckenlänge zu berechnen. a) Wie groß ist der Leitungsquerschnitt erforderlich? b) Wie groß ist die Leistung am Ausgangs- und Endpunkt der Leitung?

Zu a) Der Querschnitt des einzelnen Leitungsdrahtes muß sein:

$$q = \frac{l \cdot I \cdot c}{e_v'} \cdot \sqrt{3} = \frac{228 \cdot 30}{4 \cdot 57} \cdot \sqrt{3} = 51{,}9 \text{ qmm.}$$

Zu b) Die Leistung am Ausgangspunkt beträgt:

$$L_1 = E_1' \cdot I \cdot \sqrt{3} = 220 \cdot 30 \cdot \sqrt{3} = 11\,420 \text{ Watt.}$$

Die Leistung am Endpunkt ergibt sich:

$$L_2 = E_2' \cdot I \cdot \sqrt{3} = 216 \cdot 30 \cdot \sqrt{3} = 11\,210 \text{ Watt.}$$

Ist die zu übertragende Leistung L_2 und der Wirkungsgrad η der Übertragung gegeben, so bestimmt sich der Querschnitt einer Leitung für gleiche Belastung der drei Phasen und unter Voraussetzung der Phasenverschiebung Null bei einer einfach gemessenen Streckenlänge l auf folgende Weise: Es beträgt

die Ausgangsleistung $L_1 = E_1' \cdot I \cdot \sqrt{3};$

die Leistung am Endpunkt $L_2 = E_2' \cdot I \cdot \sqrt{3};$

der Leistungsverlust $L_v = L_1 - L_2 = I\sqrt{3} \cdot (E_1' - E_2') = I \cdot e_v' \cdot \sqrt{3}$
$= L_2 \left(\frac{1}{\eta} - 1\right);$

die Stromstärke $I = \frac{L_2}{E_2' \sqrt{3}};$

der Spannungsverlust $$e_v' = \frac{L_v}{I\sqrt{3}} = E_2' \cdot \frac{L_v}{L_2} = E_2' \left(\frac{1}{\eta} - 1\right);$$

der Leitungsquerschnitt $$q = \frac{l \cdot I \cdot c}{e_v'} \cdot \sqrt{3} = \frac{l \cdot L_2 \cdot c}{E_2'^2 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)} \quad \ldots \quad (81)$$

Diese Endformel entspricht derjenigen von § 38, C, nur ist zu berücksichtigen, daß das l in § 38 C den doppelten Wert des hier vorliegenden l hat. Der Querschnitt von § 38 C muß zweimal, derjenige von Gleichung 81 dreimal angewendet werden. Daraus folgt ein Verhältnis der Kupferkosten von Drehstrom zu Gleichstrom wie 3 zu 4 unter Voraussetzung gleicher zu übertragender Leistung, gleicher Endspannung, gleicher Streckenlänge und gleichen Wirkungsgrades bei einer Phasenverschiebung Null. Mit Berücksichtigung der durchschnittlich auftretenden Phasenverschiebungen werden die Kupferkosten in beiden Fällen angenähert gleich.

G. Drehstromtransformatoren.

Eine Möglichkeit der Transformation des Drehstromes besteht darin, den Wechselstrom jeder Phase einzeln zu transformieren. Man braucht dazu drei Transformatoren, wie sie bereits bekannt sind, und schaltet ihre primären Spulen entweder zu einem Dreieck oder zu einem Stern; ebenso verfährt man mit den Sekundärspulen. Schaltet

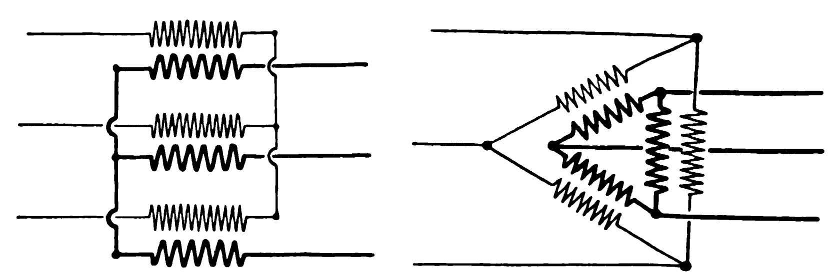


Fig. 477. Drei Transformatoren in Sternschaltung.

Fig. 478. Drei Transformatoren in Dreieckschaltung.

man primär in Dreieck, sekundär in Stern, oder umgekehrt, so ändert man das Übersetzungsverhältnis um das $\sqrt{3}$-fache oder um das $1:\sqrt{3}$-fache. Außerdem ändert man dadurch die Phase des primären Teiles gegen den sekundären Teil. Das Schema dreier in Stern geschalteter Transformatoren zeigt Fig. 477, das Schema dreier Transformatoren in Dreieckschaltung Fig. 478.

Eine zweite Möglichkeit, Drehstrom zu transformieren, erläutert Fig. 479, bei der nur ein Eisengestell verwendet wird. Die hier gezeichneten drei Eisenkerne, von denen jeder eine Primär- und eine Sekundärwicklung besitzt, seien oben und unten durch je ein gemein-

sames eisernes Schlußstück verbunden gedacht. Entsprechend dem Satz, daß die algebraische Summe der Ströme in den drei Phasen jederzeit gleich Null ist, sind auch jederzeit die Kraftlinienzahlen der drei Phasen in algebraischer Summe der Null gleich, so daß ein umlaufendes Kraftliniensystem das Gebilde durchsetzt.

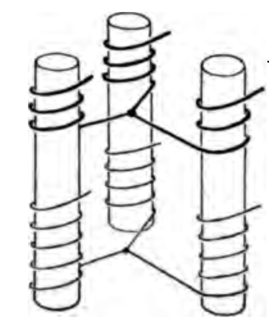


Fig. 479. Schema eines Drehstromtransformators in Sternschaltung.

Der Aufbau der Transformatoren erfolgt nach den für einphasige Transformatoren gemachten Angaben; das Eisen ist geblättert; die primären und sekundären Spulen werden unterteilt und abwechselnd aufgereiht.

Fig. 480 zeigt einen von Schuckert & Co. herrührenden Drehstromtransformator nach Wegnahme eines Schutzgehäuses.

Sollen Drehstromtransformatoren auf ein sekundäres Netz parallel arbeiten, so ist außer den für einphasige Transformatoren gegebenen Punkten auf Phasengleichheit zu achten: Stern-Stern geschaltete Transformatoren werden verwendet mit ebensolchen oder mit Dreieck-Dreieck geschalteten, andernfalls müssen durchweg Stern-Dreieck oder durchweg Dreieck-Stern geschaltete verwendet werden; dazu gehört weiter, daß die Phasen bei allen Transformatoren in gleicher Reihenfolge angeschlossen sind. Zur Feststellung der richtigen Reihenfolge kann man bei dreipolig angeschlossenem primärem Teil (Hochspannung) den sekundären Teil (Niederspannung) zunächst einpolig anschließen und dann die Glühlampenprobe machen (zwischen den weiter zu verbindenden Punkten angebrachte Glühlampen dürfen nicht leuchten).



Fig. 480. Drehstromtransformator.

Stimmt der Wickelsinn des primären Teiles gegen den sekundären nicht, so kann das nicht durch Anschluß der Leitungen, sondern nur durch Umschalten der Verkettung in einem beider Teile (gegen Fig. 468 zu verbinden 1 mit 2', 2 mit 3', 3 mit 1'; gegen Fig. 470 zu verbinden 1' mit 2' mit 3' als Nullpunkt) richtig gestellt werden.

In der Praxis verläßt man sich auf die von der liefernden Firma angebrachte Bezeichnung der Klemmen, so daß unter Beachtung gezeichneter Kabelseelen der Anschluß nach äußerlichen Regeln erfolgen kann.

H. Asynchrone Drehstrommotoren (Induktionsmotoren).

Drehstrommotoren besitzen auf einem feststehenden, aus geblättertem Eisen hergestellten Ständer die unter C dieses Paragraphen gekennzeichneten drei Wicklungen, die entweder zu einem Stern oder zu einem Dreieck geschaltet sind. Die sekundliche Umlaufszahl des Feldes ist gleich den am Schluß der Lehre von den Wechselstromgeneratoren S. 471 mit n' angegebenen Werten.





Fig. 481. Kurzschlußläufer.



Fig. 482. Drehstrommotor mit Schleifringen (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

Innerhalb der Ständerbohrung ist der umlaufende Teil der unter B dieses Paragraphen gekennzeichnete Läufer, gewöhnlich aus geblättertem Eisen hergestellt, mit geringem Luftraum angeordnet. Die auf ihm liegenden Leiter sind in Nuten untergebracht. Werden sie unmittelbar an den Stirnseiten durch je einen Ring miteinander verbunden, so heißt der Läufer Kurzschlußläufer (Fig. 481). Wird die Läuferwicklung auch in Spulen entsprechend der Polzahl des Ankers und gewöhnlich auch dreiphasig hergestellt, so kann man die Klemmen der zu Dreieck oder Stern geschalteten Läuferwicklung mit Schleifringen verbinden, die unter Zuhilfenahme von Bürsten eine Einschaltung von Widerständen in die Läuferwicklung gestatten. Solche Läufer heißen Phasen- oder Schleifringläufer. Fig. 482 stellt das Äußere eines solchen Motors mit Schleifringen dar.

Die in der Läuferwicklung auftretenden Ströme werden bei dem Umlauf des Kraftlinienfeldes induziert. Die Zusammenwirkung zwischen diesen Strömen und dem Magnetfeld verursacht eine Drehung des Läufers in Richtung der Feldbewegung. Ist der Motor belastet, so bleibt der Läufer in der Umgangszahl etwas gegen den Leerlauf zurück. Das Nachbleiben des Läufers heißt die Schlüpfung, man drückt sie in Prozent der Umlaufszahl des Feldes aus.

Ein reiner, praktisch nicht vorkommender Leerlauf wäre beim Läuferstrome Null und bei einer Läufergeschwindigkeit gleich der

Feldgeschwindigkeit zu denken. Bei gut ausgeführten Motoren beträgt die Schlüpfung bei Vollast nur wenige Prozent (etwa 5 %). In den Wicklungen des Läufers ist die Frequenz sehr gering. Beträgt die Frequenz des Ständerstromes ν und die Schlüpfung p Prozent, so ist die Läuferfrequenz

$$\nu_L = \nu \cdot p : 100, \qquad (82)$$

so daß beispielsweise bei $p = 2\,\%$ Schlüpfung und $\nu = 50$ Perioden in der Sekunde $\nu_L = 1$ Periode in der Sekunde beträgt.

Es spielt daher bei dem in Betrieb befindlichen Motor die Selbstinduktion des Läufers keine Rolle, der Läuferstrom liegt stets in der Phase seiner Spannung, d. h. der Läuferstrom tritt stets in dem ihn induzierenden Felde auf. Infolge der geringen Frequenz ist auch der Leistungsverlust im Läufer durch Hysterese und Wirbelstrom unerheblich, so daß für den Läufer auch massives Eisen verwendet werden kann.

Die Läuferamperewindungen sind Gegenamperewindungen zu denjenigen des Ständers. Beide Amperewindungen setzen sich zu den magnetisierenden Amperewindungen zusammen. Daher steigt auch die vom Ständer aufgenommene Stromstärke und Leistung mit steigender Belastung des Motors, wobei sich der Phasenwinkel zwischen Ständerspannung und Ständerstrom mit Vermehrung der Belastung verkleinert.

Steht der Läufer noch still und soll er in Gang gesetzt werden, so ist seine Frequenz nach dem Anschließen zunächst groß, der Läuferstrom verschiebt sich gegen die Läuferspannung infolge der Selbstinduktion nahezu um 90°, d. h. der Läuferstrom tritt zwischen den Kraftflüssen auf, die Ständer und Läufer gemeinsam erzeugen, und der Läufer erhält dadurch bei Annahme von genau 90° Verschiebung kein Drehmoment; die Stromaufnahme des Ankers ist sehr groß, denn der Läufer vertritt die Rolle einer kurzgeschlossenen Sekundärwicklung eines Transformators; es wird alle zugeführte Leistung in Wärme umgesetzt. Je größer jedoch der Widerstand (die wahre Ohmzahl) des Läufers ist, um so mehr wird der Strom des Läufers in die Phase der Läuferspannung gezogen. Es gibt einen Widerstand des Läuferkreises, bei dem das Drehmoment im Anlauf am größten ist, und das ist derjenige, den man durch Einschalten eines Anlaßwiderstandes in die Läuferwicklung mit Hilfe der drei Schleifringe tatsächlich für das Anlassen herstellt. Durch Einschalten von Widerstand in den Läuferkreis wird die Stromaufnahme des Ankers beim Anlassen gegen den Fall des kurzgeschlossenen Läufers verringert und das Anzugsdrehmoment vergrößert.

Beim Anlassen wird der vorgeschaltete Läuferwiderstand bis zum Kurzschluß des Läufers verringert; bliebe unnötigerweise im Betrieb ein vergrößerter Widerstand im Läuferkreise, so würde sich daraus vergrößerte Schlüpfung und verringerter Wirkungsgrad ergeben. Die zum Anlassen eines Drehstrom-Schleifringmotors erforderliche Einrichtung

ist schematisch für Dreieckschaltung durch Fig. 483 dargestellt. Das äußere Dreieck bezeichnet die Wicklung des Ständers, das innere die Wicklung des Läufers, während von den Klemmen des Läufers aus (in Wirklichkeit unter Vermittlung von Schleifringen) Drähte zu den drei Widerständen w_1, w_2 und w_3 führen, die durch eine gemeinsame dreifache Metallkurbel K gleichmäßig verkleinert werden können. Steht die Kurbel an der durch Null angegebenen Stelle, so ist die Läuferwicklung in sich kurz geschlossen; also hat man die Verhältnisse, wie sie bei dem Betrieb verlangt werden. Bei dem Anlassen schaltet man zuerst durch den dreipoligen Hebel H den Anker ein, während die Kurbel K noch den Läuferkreis offen läßt. Nun dreht man K langsam, dem Anlauf des Motors folgend, auf die mit Null bezeichnete Stelle zu, wo sie während des Betriebes stehen bleibt. Man schaltet den Motor ab durch Herausziehen des Hebels H, worauf noch das Zurückdrehen von K zu erfolgen hat. Das Anlaßverfahren mit Widerstand im Läuferkreise führt zu den besten Ergebnissen in bezug auf große Anzugsdrehmomente und geringen Anlaufstrom, so daß Motoren dieser Art ähnlich den Gleichstrommotoren allen vorkommenden Ansprüchen genügen. Von Wichtigkeit ist ein geringer Spannungsabfall in der Zuleitung, da das Anzugsmoment eines bestimmten Motores etwa dem Quadrat der Ständerspannung proportional ist.

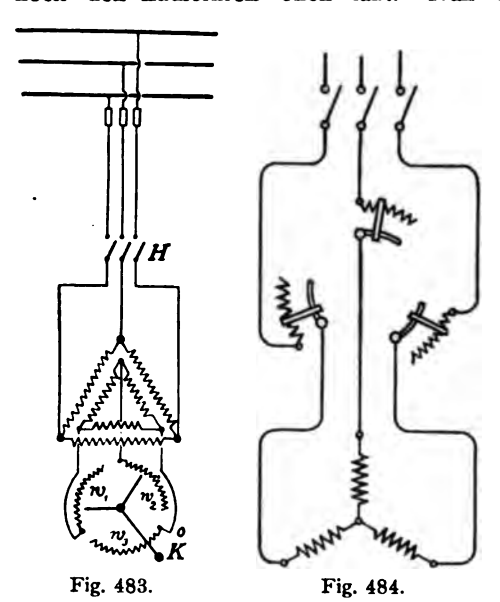


Fig. 483. Fig. 484.

Ein Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer kann nur für unbelasteten oder gering belasteten Anlauf verwendet werden. Da die Phasenverschiebung zwischen Läuferstrom und Spannung niemals genau 90° wird, ist ein geringes Drehmoment auch im Anlassen vorhanden. Eine Verbesserung der Anlaßverhältnisse durch Wahl eines größeren Läuferwiderstandes hat eine Verschlechterung der Betriebsverhältnisse zur Folge. Ein Anlaßschema für Drehstrommotoren mit Kurzschlußläufern gibt Fig. 484, das einen Ständer in Sternschaltung annimmt. Der Anlaßwiderstand liegt in der Zuleitung.

Eine Anzahl von Anlaßmethoden laufen darauf hinaus, den Anlaufstrom bei bestimmtem Anlaufsdrehmoment herabzudrücken und die

Grenze der ohne Anlaßwiderstand anschließbaren Motoren in bezug auf die Leistung nach oben hinauszuschieben. Hierher gehören Umschaltvorrichtungen, die den Läufer beim Anlassen in Stern, beim Betrieb in Dreieck umzuschalten gestatten; weiterhin solche, die den Ständer zum Anlassen in Stern, zum Betrieb in Dreieck umzuschalten gestatten; schließlich können beide Umschaltungen zusammen angewendet werden.

Man erreicht bei 1,5-pferdigen Dreiphasenmotoren etwa 75, bei 7-pferdigen etwa 85 % Wirkungsgrad.

Außer den bisher behandelten Drehstrommotoren gibt es noch solche, die auf demselben Verfahren beruhen, wie die synchronen Wechselstrommotoren: ein Kranz von Magnetpolen, die durch Gleichstrom erregt werden, befindet sich innerhalb eines Drehstromständers. Die Pole drehen sich synchron mit dem Felde. Die zuerst behandelten Drehstrommotoren heißen zur Unterscheidung von den synchronen asynchrone Motoren. Synchrone Drehstrommotoren sind mit höherem Wirkungsgrad herstellbar als asynchrone und kommen daher dort in Betracht, wo es sich bei größerer elektrischer Leistung um die Umwandlung in eine andere Stromart handelt.

Ein Drehstrom-Synchronmotor läuft ohne weiteres nicht an, man läßt ihn vielmehr entweder durch einen besonderen Motor an, oder man benutzt bei Umformern die Gleichstromseite zum Anlassen.

§ 121. Der Zweiphasenstrom.

A. Erklärung des zweiphasigen Systemes.

Zur elektrischen Übertragung eines Drehfeldes bzw. eines Wanderfeldes bedient man sich auch des Zweiphasenstromes, und zwar ist das letztere Verfahren historisch [Hist. 55]) das ältere. Der Anker eines Stromerzeugers ist nach dem Schema der Fig. 485 mit zwei Wicklungen

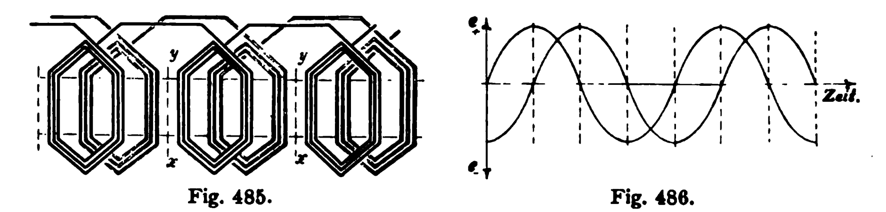


Fig. 485. Fig. 486.

versehen. Dieses Schema enthält zwei nach Fig. 394 eingerichtete, um 90° gegeneinander versetzte Wicklungen. Zwischen den Klemmen der beiden Wicklungen entstehen bei dem Umlauf des Magnetkranzes Spannungen, die nach dem Schaubild der Fig. 486 ebenfalls um 90° gegeneinander verschoben sind.

Ist eine zweite genau so beschaffene Einrichtung an den Anker der Fig. 485 angeschlossen, indem einander entsprechende Klemmen

miteinander verbunden sind, so erzeugen die von dem Generatoranker ausgehenden Ströme in dem zweiphasigen Ständer ebenfalls ein wanderndes magnetisches Feld, das auf einen Läufer in der gleichen Weise einwirken kann, wie es an den Dreiphasenmotoren erkannt wurde.

B. Die Anwendung von drei Leitungsdrähten.

Man verbindet zwei Klemmen der beiden Ankerwicklungen miteinander und läßt die Leitungen an der gemeinsamen Klemme und

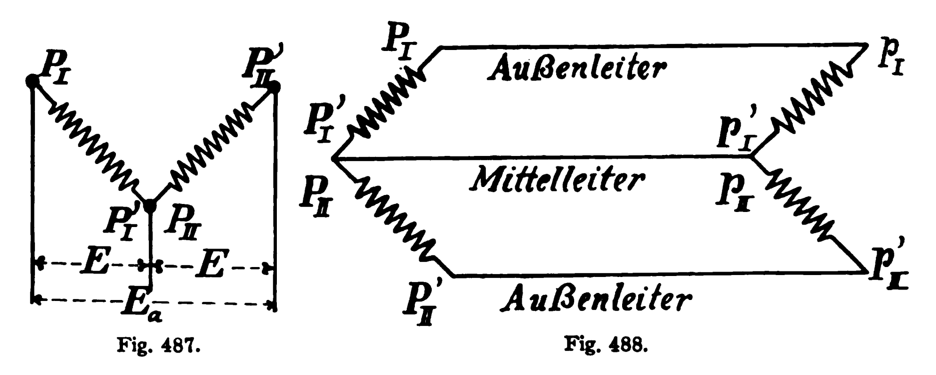


Fig. 487. Fig. 488.

an den beiden übrigbleibenden Klemmen angreifen, so wie es Fig. 487 darstellt. In der gleichen Weise schaltet man den Ständer des Motors, so daß für eine zweiphasige Übertragung das Schema Fig. 488 entsteht.

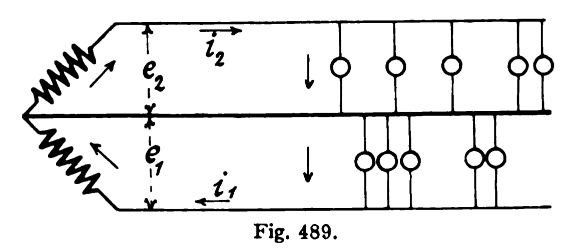


Fig. 489.

Der an der gemeinsamen Klemme angreifende Leiter heißt der Mittelleiter, die beiden übrigen heißen die Außenleiter.

Die Umkehr der Drehrichtung erfolgt durch Vertauschen der beiden Außenleiter.

Die Schaltung der Lampen im verketteten System erfolgt nach Fig. 489, also zwischen Außenleitern und Mittelleiter.

C. Stromstärke, Spannung und Leistung des verketteten Systemes.

Zur Untersuchung der Außenleiterspannung E_a im Vergleich mit der Spannung E der einzelnen Phasen dient Fig. 490. Dieses Schaubild läßt erkennen, daß der augenblickliche Scheitelwert der Außenleiterspannung e_a sein muß:

$$e_a = e \cdot \sqrt{2}, \tag{83}$$

wobei e die Scheitelwerte der Spannungen (in Fig. 490 bezeichnet mit e_1 und e_2) der einzelnen Phasen bedeutet. Der aus den Augenblicks-

werten e_a sich ergebende Effektivwert E_a ist mit den Effektivwerten der Einzelspannungen E durch die entsprechende Gleichung verbunden:

$$E_a = E\sqrt{2}; \tag{84}$$

Die Phase der Außenleiterspannung ist gegen beide Einzelspannungen um je 45^0 verschoben.

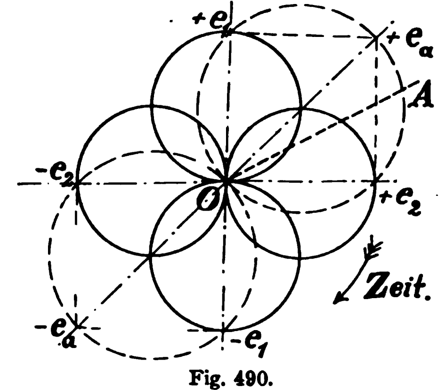


Fig. 490.

Dasselbe gilt von den Strömen: Der Mittelleiter einer Zweiphasenanlage führt einen Strom

$$I_m = I\sqrt{2}, \tag{85}$$

wobei I den Strom in der Ankerwicklung bzw. im Außenleiter bedeutet.

Daraus folgt: Bei Verkettung beider Phasen bekommt der Mittelleiter bei gleichem Spannungsverlust geringeren Querschnitt, als beide an seine Stelle tretende Leiter ohne Verkettung in Summa haben müßten.

Eine Zweiphasenanlage ist als eine Zusammenstellung von zwei Einphasenanlagen anzusehen. Wird an den Klemmen beider Phasen die gleiche effektive Spannung E erzeugt, und fließt in beiden Phasen

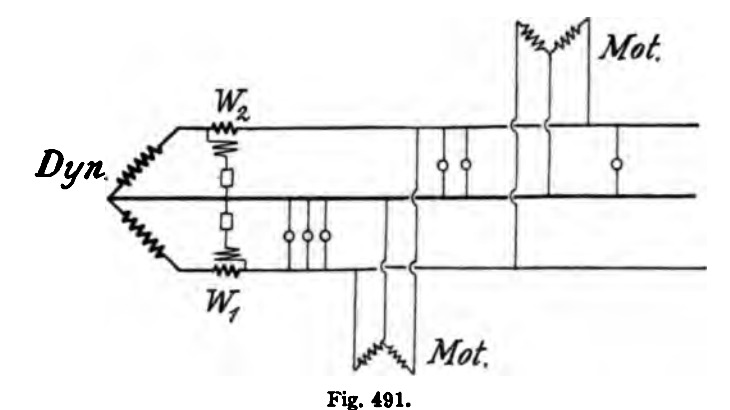


Fig. 491.

die gleiche effektive Stromstärke I, so ist die Leistung der gesamten Anlage, wenn beide Phasen auf induktionslosen Stromkreis arbeiten:

$$L = 2 \cdot E \cdot I. \tag{86}$$

Für die verkettete Anlage wird daher mit Gleichung 84 unter Anwendung obiger Bezeichnungen

$$L = E_a \cdot I \cdot \sqrt{2}. \tag{87}$$

In jedem Falle, also auch bei induktiver Belastung, erhält man die Leistung durch Messung mit zwei Leistungsmessern, die in Fig. 491 mit W_1 und W_2 bezeichnet und nach Angabe dieses Schemas zu schalten sind, als algebraische Summe der Angaben beider Instrumente. Bei induktiver Belastung zeigen beide Leistungsmesser bei gleichen Strömen und gleichen Spannungen beider Seiten verschiedene Werte an.

D. Zweiphasentransformatoren.

Die Transformation kann erstens durch Anwendung zweier Einphasentransformatoren erfolgen, die nach dem Schema Fig. 492 anzuschließen sind. Jeder Transformator multipliziert oder dividiert die Spannung seiner Phase im Verhältnis seiner primären und sekundären Windungszahl, so daß zwischen primärer und sekundärer Spannung in beiden Phasen gleiche zeitliche Winkel entstehen. Sekundär erhält man dann ebenfalls wieder Spannungen und Ströme, die in beiden Phasen um 90° zueinander verschoben sind.

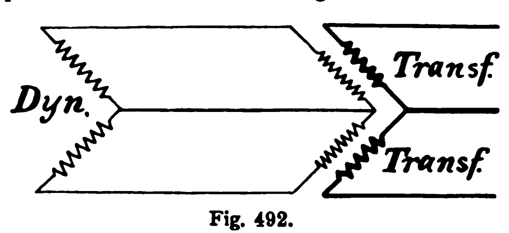


Fig. 492.

Zweiphasentransformatoren enthalten die vier Wicklungen an einem Eisengestell, das drei Joche besitzt, so wie es die Fig. 493, oder drei

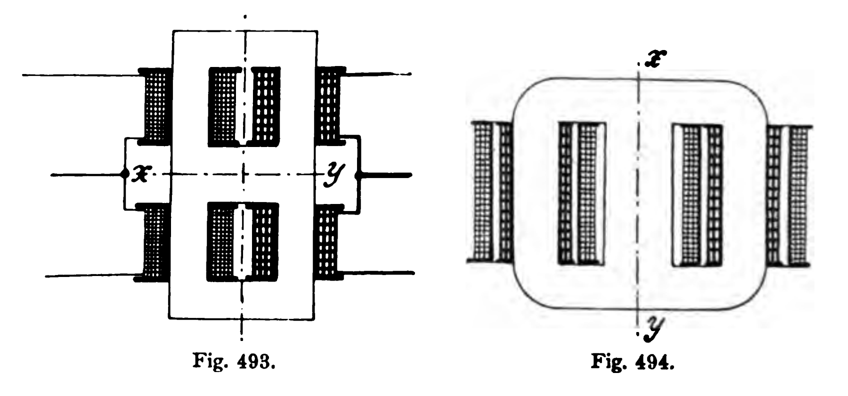


Fig. 493. Fig. 494.

Schenkel, so wie es Fig. 494 andeutet. Das mittlere Stück $x—y$ führt einen um das $\sqrt{2}$-fache größeren Kraftfluß als das übrige Eisengestell, und es hat daher einen Sinn, dieses Stück entsprechend stärker zu machen.

Für die Parallelschaltung der Transformatoren gilt alles entsprechend, was über die Parallelschaltung bei Drehstromtransformatoren gesagt ist.

E. Meßinstrumente nach dem Ferraris[Hist. 55])system. Durch Parallelschalten eines induktiven und induktionslosen Widerstandes kann eine Phasenverschiebung von rund 90° in den beiden parallelgeschalteten Kreisen erreicht werden. Die von einem gewöhnlichen Wechselstrom aus auf diese Weise erzeugten, zueinander verschobenen Ströme werden durch eine im Prinzip den Ständer eines Zweiphasenmotors darstellende Einrichtung geschickt. Das dadurch erzeugte Drehfeld übt auf eine, in der Ständeröffnung drehbare (Läufer-) Spule eine drehende Kraftwirkung aus, die bei geringer Sättigung dem Quadrate des Stromes und des Feldes proportional ist. Mit der drehbaren Läuferspule dreht sich gegen die Kraftwirkung einer Spiralfeder ein Zeiger, an dem der Strom bzw. die Spannung abgelesen wird.

§ 122. Die asynchronen Motoren für einphasigen Wechselstrom (Induktionsmotoren).

Nach dem Vorbilde der Mehrphasenmotoren gibt es auch einphasige Motoren mit Läufer. Dieser Läufer trägt, wie bei den Mehrphasenmotoren, eine während des Betriebes in sich geschlossene Wicklung. Folgende Betrachtung läßt die Wirkungsweise dieser Motoren erkennen:

Es liege ein feststehender Wechselstromständer vor, der für die zunächst folgende Betrachtung mit nur einer Wicklung, wie bei einem einfachen Wechselstromgenerator, angenommen sein möge.

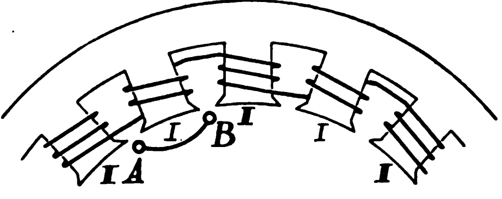


Fig. 495.

Ein Wechselstrom, der die Windungen des Ständers durchfließt, erzeugt während der einen halben Periode etwa bei *I* (Fig. 495) einen Nordpol und zugleich bei *II* einen Südpol. Während der anderen halben Periode hat der Strom die entgegengesetzte Richtung und bildet bei *I* einen Südpol, bei *II* einen Nordpol. Es soll nun zunächst eine in sich geschlossene Windung *AB* vor den Polen vorbeibewegt werden. Die Geschwindigkeit dieser Windung sei so groß, daß sie während eines Wechsels der Spannung um einen Pol weiterrückt. Unter dieser Voraussetzung befinde sich die Spule etwa nach dem Bilde der Fig. 495 gerade vor einem Nordpol in der dort gezeichneten Stellung, während der Pol *I* gerade die maximale Anzahl seiner Kraftlinien aussendet. Einen Polwechsel später steht dann die Spule in derselben Stellung unter Pol *II*, der jetzt gleichnamig mit demjenigen Pole ist, der vorher bei *I* erzeugt worden war. Wenn auch die Stärke des von der Anker-

wicklung herrührenden magnetischen Feldes während des Überganges von *I* zu *II* einmal Null geworden ist, findet die bewegliche Spule bei *II* wieder dieselbe Feldrichtung vor, die bei dem Verlassen von *I* geherrscht hatte. Man kann daher, wenn man von der Schwankung der Feldstärke absieht, ein einfaches Wechselfeld als ein Wanderfeld auffassen, das in jeder halben Periode um einen Polabstand vorrückt. In der bewegten Spule *AB* wird während der Abnahme des Feldes zwar ein kurzer Stromstoß in der einen Richtung erzeugt, der aber durch das darauffolgende Anwachsen der Feldstärke, die für Spule *AB* wieder in derselben Richtung verläuft, ausgeglichen wird. Es werden also von der bewegten Spule bei ihrer synchronen Bewegung von Pol zu Pol in algebraischer Summe keine Kraftlinien geschnitten. Aus diesem Grunde wird auch in der Spule bei ihrer Bewegung von Pol zu Pol kein Strom von vorherrschender Richtung erzeugt.

Bleibt die Spule *A B* dagegen in ihrer Bewegung etwas gegen die Feldgeschwindigkeit zurück, so wird sie bei dem nächsten Pol nicht von derselben Anzahl von Kraftlinien durchsetzt, als sie bei dem vorherigen Pol innerhalb ihrer Windungen aufgenommen hatte. Es findet dann innerhalb der Windungen der Spule *A B* bei ihrer Bewegung von Pol zu Pol eine Abnahme von Kraftlinien statt. Dieser Verminderung der Kraftlinienzahl entspricht in den Windungen der Spule ein induzierter Strom, der in Verbindung mit dem magnetischen Felde eine Kraft auf die Spule ausübt, die sie in der einmal begonnenen Bewegung weiterzubringen sucht. In der Spule *A B* fließt bei fortgesetzter Bewegung, wie es auch bei Läuferspulen der Mehrphasenmotoren gesehen wurde, infolge des Nachbleibens ein Wechselstrom mit sehr geringer Wechselzahl, dem allerdings ein Wechselstrom höherer (gegen den Ständerstrom doppelter) Frequenz ohne treibende Kraftwirkung übergelagert ist. Die geringe Frequenz des wirksamen Stromes im Läufer ist um so höher, je mehr die bewegte Spule hinter der Feldgeschwindigkeit zurückbleibt, oder was dasselbe heißt, je größer die Kraft ist, welche die Spule bei ihrer Bewegung auszuüben hat.

Der Läuferstrom bewirkt, daß das Feld zwischen jedem Wechsel des Ständerstromes nicht bis zur Null hin abnimmt; es entsteht durch das Zusammenwirken von Ständer und rotierendem Läufer ein Drehfeld, das bei seinem Umlauf nur Schwankungen innerhalb der gleichen Richtung unterworfen ist.

Mit Vermehrung der an der Läuferachse abgenommenen Leistung nimmt der Ständer ebenfalls vermehrten Strom und vermehrte Leistung auf, wobei der Phasenwinkel zwischen Klemmenspannung und Ständerstrom mit Vermehrung der Belastung sich verkleinert.

Diese Motoren vertragen sehr geringe Schlüpfung, d. h. es kann die Läufergeschwindigkeit nur um wenige Prozent hinter dem Synchronismus zurückbleiben.

Für den Stillstand des Läufers ist ein Wechselfeld nicht als Drehfeld anzusehen, wenigstens kann es als ein Drehfeld nach beiden

Drehrichtungen aufgefaßt werden. Es heben sich die Kraftwirkungen nach beiden Richtungen für den stillstehenden Läufer auf.

Für das Anlassen ist ein wirkliches Drehfeld herzustellen. Das magnetische Feld darf in keinem Augenblick ganz verschwinden. Es muß in der Mitte zwischen zwei in Fig. 495 gezeichneten Polen auch bei stillstehendem Läufer noch einen bestimmten Wert in derselben Richtung haben, in der es, als umlaufendes Feld aufgefaßt, beim Verlassen eines Pols abnimmt und bei der Annäherung an den nächstfolgenden Pol wieder zunimmt. Ein umlaufendes Feld von konstanter Stärke wie beim Drehstrommotor ist zwar nicht erforderlich, würde aber den günstigsten Fall bilden.

Man erreicht das zum Anlassen notwendige Drehfeld durch einen zweiphasig gewickelten Ständer, indem die beiden Wicklungen parallelgeschaltet werden, und indem einer der beiden Zweige eine Kapazität oder eine Selbstinduktion erhält. Dieser Zweig erzeugt die Hilfs- oder Kunstphase. Die zu ihm gehörende Ständerwicklung ist aus dünnerem Draht hergestellt als die Hauptwicklung und nimmt weniger Platz ein; man kann das so machen, da sie nur vorübergehend, so lange das Anlassen dauert, von Strom durchflossen, sonst aber nutzlos ist.

Für die Betriebs- und Anlaßeinrichtung entsteht demnach das Schema Fig. 496, an der die Klemmen der Hauptphase mit P_I und P'_I, diejenigen der Hilfsphase mit P_{II} und P'_{II} bezeichnet sind.

Das Anlassen erfolgt, indem bei Stellung der Kurbel k des im Läuferkreise befindlichen Anlaßwiderstandes auf größter Ohmzahl und bei geschlossenem Ausschalter a in der Hilfsphase der zweipolige Schalthebel S eingelegt wird. Dann wird, dem Anlauf des Motors folgend, k zu geringeren Widerständen gedreht. Bei Stellung von k auf einem bestimmten, als dem günstigsten ausgeprobten Kontakt wird a herausgezogen, worauf das weitere Abschalten des Läufervorschaltwiderstandes mit Hilfe von k vorgenommen wird. Das Ausschalten des Motors geschieht durch Herausziehen von S und Zurückdrehen von k.

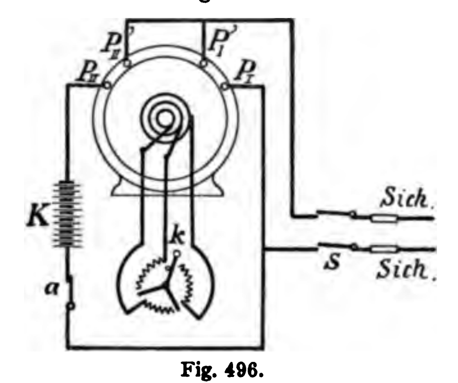


Fig. 496.

Bringt man in der Schaltung nach Fig. 496 an Stelle der Kapazität K eine Selbstinduktion an, so wird dadurch die Drehrichtung umgekehrt. Mit einer bestimmten Einrichtung, entweder einer Kapazität oder einer Selbstinduktion, erhält man umgekehrten Lauf des Motors, indem die Zuleitungen an den Klemmen P_{II} und P'_{II} der Hilfsphase vertauscht werden.

Eine weitere Möglichkeit eines Anlaßschemas, und zwar unter Verwendung eines Kurzschlußläufers zeigt Fig. 497. Für das Anlassen liegt der Umschalter *U* auf *A*; die Kurbel *a* wird langsam dem Anlauf des Motors folgend von *b* nach *c* gedreht, wo sie während des Betriebes stehen bleibt. Nach dem Anlassen wird *U* auf *B* gestellt. *I* ist Hilfsphase, *II* ist Hauptphase. Die Phasenverschiebung entsteht, indem der Hilfsphase ein induktionsloser Widerstand parallelgeschaltet wird. Der Anlaßwiderstand liegt in der Zuleitung. Durch Umlegen von *U* zu *B* wird *I* abgeschaltet und *II* allein angeschlossen.

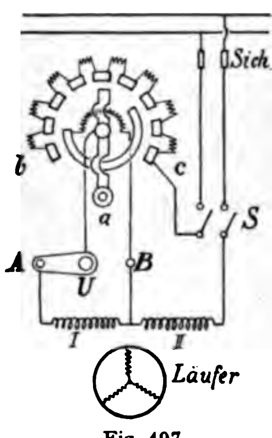


Fig. 497.

Die Stromwärme in den hier beschriebenen Motoren unter sonst gleichen Verhältnissen ist wesentlich größer, als in den Mehrphasenmotoren, ihr Wirkungsgrad ist daher für gleiche Leistung geringer. Gleiche Leistung verlangt größere Typen, als bei Mehrphasenmotoren.

Spannungsverlust in der Zuleitung hat dieselbe Bedeutung wie bei Mehrphasenmotoren.

Der Leerlaufstrom der Einphasenmotoren ist auffällig groß gegen denjenigen der Mehrphasenmotoren.

In der Überlastung fällt der Einphasenmotor im Vergleich zum Mehrphasenmotor leicht aus dem Gang.

Einphasenmotoren nach dem hier beschriebenen System sind in denjenigen Städten, die überhaupt Einphasenzentralen aufweisen, die am meisten verbreitete Art von Wechselstrommotoren. Nur bei sehr geschickter Einrichtung der Motoren und ihrer Hilfsapparate werden bei leerem Anlauf Anlaßströme erhalten, die die Elektrizitätswerke zulassen. Das Anlaßschema nach Fig. 496 ist in diesem Sinne günstiger, als dasjenige nach Fig. 497.

Einphasige Wechselstrommotoren für größere Anzugsmomente gibt es nach verschiedenen Systemen, deren Erklärung über den Rahmen dieses Lehrbuches hinausgeht. Erwähnt sei hierzu nur, daß nach dem Verfahren des Hauptschlußmotors Kollektormotoren hergestellt werden können, die für Wechselstrom geeignet sind.

Wissenschaftliche Ergänzungen.

1. (Zu S. 221). Die gestrichenen Werte bedeuten hier Differentiale. Die in endlicher Entfernung c von einem unendlich langen, geraden, von i durchflossenen Leiter auftretende Feldstärke ist an Stelle der Entwicklung von § 69 A schneller zu finden:

$$\mathfrak{H} = i \int_{l=-\infty}^{l=+\infty} \frac{d\,l}{r^2} \cdot \sin\alpha\,,$$

wobei $r = \sqrt{l^2 + c^2}$ und $\sin\alpha = c : r$; daraus folgt:

$$\mathfrak{H} = i \cdot c \int_{l=-\infty}^{l=+\infty} \frac{d\,l}{(l^2 + c^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{i}{c} \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + c^2}} \right]_{l=-\infty}^{l=+\infty} = \frac{2 \cdot i}{c}\,.$$

2. (Zu S. 241 und 444). Die Bezeichnung $\mathfrak{B}$ bildet nur einen Ersatz für den Differentialquotienten

$$-\frac{d\,\mathfrak{N}}{d\,t}\,,$$

wobei $d\,\mathfrak{N}$ das Differential des Kraftflusses und $d\,t$ das Differential der Zeit bedeutet, in der $d\,\mathfrak{N}$ von dem Leiter geschnitten wird. So ruft der Vorgang eine augenblickliche Spannung hervor

$$E_{\text{Volt}} = -\frac{d\,\mathfrak{N}}{d\,t} \cdot 10^{-8}.$$

Das Vorzeichen wird im Text des Lehrbuches nicht berücksichtigt; wo es auf Unterscheidung von Richtungen ankommt, werden die Handregeln verwendet.

3. (Zu S. 440). Wird der zeitliche Winkel als α bezeichnet, während der Winkel $2\,\pi$ die Zeit einer Periode bedeutet, so gilt:

$$I = \sqrt[2]{\frac{1}{2\,\pi} \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} i_\alpha^2 \cdot d\,\alpha} = \sqrt[2]{\frac{1}{2\,\pi} \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} i_\frown^2 \cdot \sin^2\alpha \cdot d\alpha}$$

$$= i_\frown \sqrt[2]{\frac{1}{2\,\pi} \left[\frac{1}{2}\,\alpha - \frac{1}{4} \sin 2\,\alpha \right]_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi}} = \frac{i_\frown}{\sqrt{2}}\,.$$

4. (Zu S. 449). Der Wert j bedeutet den Differentialquotienten

$$\frac{di}{dt},$$

wobei di das Differential des Stromes und dt das Differential der Zeit sei. Die direkt auftretende Selbstinduktionsspannung beträgt:

$$e_s' = -S \cdot \frac{di}{dt};$$

dieser Ausdruck folgt aus (s. unter 2):

$$e_s' = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt} \cdot 10^{-8} = -\frac{d(c \cdot i)}{dt} \cdot 10^{-8};$$

c ist hierin eine positive Zahl (s. Bem. 4 auf S. 443).

Das e_s der Gleichung 24 bedeutet den Gegenwert zu e_s', also die treibende EMK des Kreises unter Annahme von Widerstandslosigkeit. Beide Spannungen ergänzen sich unter dieser Annahme zu Null; daher gilt hierfür algebraisch:

$$e_s + e_s' = 0;$$

oder

$$e_s - S\frac{di}{dt} = 0.$$

Mit dieser Ergänzung ist das Vorzeichen der rechten Seite von Gleichung 24 richtig.

5. (Zu S. 449). Die direkt auftretende Selbstinduktionsspannung ergibt sich in ihrem Scheitelwert unter Annahme sinusförmigen Verlaufes als der Differentialquotient des unter 4 dieser Ergänzungen gegebenen Ausdruckes für e_s' für die Punkte $t = 0$, $t = \frac{1}{\nu}$, $t = \frac{2}{\nu}$ usw.:

$$e_{s\frown}' = -S\frac{di}{dt} = -S\frac{d(i_\frown \sin 2\nu\pi t)}{dt} = -i_\frown \cdot 2\nu\pi S;$$

$e_{s\frown}$ der Gleichung 25 bedeutet hierzu den Gegenwert, daher ist das Vorzeichen der rechten Seite von Gleichung 25 richtig.

6. (Zu S. 460). e_k ist der Gegenwert zu der dem Kondensator innewohnenden Spannung e_k', also die treibende EMK des Kreises unter Annahme von Widerstands- und Selbstinduktionslosigkeit. Beide Spannungen ergänzen sich unter dieser Annahme zu Null; daher gilt hierfür algebraisch:

$$e_k + e_k' = 0;$$

e_k' unterliegt der Bedingung:

$$C \cdot de_k' = -i \cdot dt,$$

woraus sich

$$e_k' = -\frac{1}{C}\int i \cdot dt$$

und

$$e_k - \frac{1}{C}\int i \cdot dt = 0$$

ergibt.

7. (Zu S. 465). In jedem Augenblick müssen sich sämtliche Spannungen, die treibenden und die zu überwindenden zu Null ergänzen. Nach Punkt 3 von S. 443 und mit Berücksichtigung der Nummern 4 und 6 dieser Ergänzungen lautet somit die allgemeine Gleichung, nach der ein Wechselstrom auftritt:

$$E + e_w' + e_s' + e_k' = 0$$

oder

$$E - i \cdot w - S \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{C}\int i \cdot dt = 0 \cdot$$

Darin bedeutet:

E die treibende EMK des Kreises (Volt),
w den Widerstand „ „ (Ohm),
S den Selbstind.-Koeff. „ „ (Henry),
C die Kapazität „ „ (Farad),
i die Stromstärke „ „ (Ampere),
dt ein Zeitdifferential, über das die gedachte Änderung sich erstreckt.

Obige Gleichung setzt nur Hintereinanderschaltung aller einzelnen Teile voraus, wobei C die Kapazität eines einzelnen Kondensators bedeutet. Im besonderen sei dazu erwähnt:

Parallelgeschaltete Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1, C_2, C_3 usw. besitzen unter der Voraussetzung, daß der Widerstand ihrer Zuleitungen vernachlässigt werden kann, eine Ersatzkapazität:

$$C_P = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots.$$

Die Kapazität hintereinandergeschalteter Kondensatoren beträgt bei gleichen Bezeichnungen der Einzelwerte:

$$C_H = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots}.$$

Mehrere parallelgeschaltete Spulen mit den Selbstinduktionskoeffizienten S_1, S_2, S_3 usw. ergeben, falls ihre wahren Widerstände verschwinden, einen Ersatzselbstinduktionskoeffizienten:

$$S_P = \frac{1}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \ldots}.$$

Bei Hintereinandergeschalteten Spulen sind die einzelnen Selbstinduktionskoeffizienten zu addieren, damit der gesamte Selbstinduktionskoeffizient erhalten wird:

$$S_H = S_1 + S_2 + S_3 + \ldots$$

In bezug auf selbstinduktionslose Widerstände gilt alles, wie bei Gleichstrom, hingegen führt die Berücksichtigung der wahren Widerstände in Stromverzweigungen mit Selbstinduktion oder Kapazität zu weniger einfachen Ergebnissen.

Historische Übersicht.

1) Es ist seit dem Altertum bekannt, daß Bernstein, den man zuvor gerieben hat, die Fähigkeit besitzt, leichte Körper anzuziehen.

2) William Gilbert (1540 Colchester — 1603 London), Leibarzt der Königin Elisabeth, ist der erste, der die elektrischen Anziehungen von den magnetischen unterschied. Er hat das Wort „Elektrizität" und „elektrisch" nach dem griechischen Worte ἤλεκτρον (= Bernstein) geschaffen.

3) Galileo Galilei (1564 Pisa — 1642 Florenz) ist der erste Forscher, bei dem der Begriff der mechanischen Arbeit hervortritt.

4) Otto von Guericke (1602 Magdeburg — 1686 Hamburg) rieb eine umlaufende Schwefelkugel mit der Hand und beobachtete außer den anziehenden auch die abstoßenden Wirkungen, sowie die Übertragung der Elektrizität durch Berührung.

5) Isaac Newton (1642 Grafschaft Lincolnshire — 1729 Kensington), Begründer der modernen Naturwissenschaft, Entdecker des Gravitationsproblems.

6) Stephan Gray unterscheidet 1729 Leiter und Nichtleiter.

7) 1745 Entdeckung der „Verstärkungsflasche" durch E. von Kleist zu Kammin (Pommern) und Cunaeus in Leyden.

8) Dufay, franz. Physiker, erkennt 1763 den Unterschied der „Glaselektrizität" und „Harzelektrizität".

9) Die durch Reibung erzeugte Elektrizität zieht seit 1750 das Interesse weiterer Kreise auf sich. Um diese Zeit wird auch die Möglichkeit der Fortleitung von Elektrizität durch Drähte über größere Entfernungen bekannt. Es entwickelt sich auch um diese Zeit die Kenntnis von der Wärmewirkung im von Elektrizität durchflossenen Drahte, und zwar zunächst im Entladungskreise der Leydener Flasche.

10) Benjamin Franklin (1706—1790), amerikanischer Privatgelehrter, Abgeordneter der Stadt Philadelphia, Erfinder des Blitzableiters, führt die Bezeichnungen positiv und negativ in das Gebiet der Elektrizitätslehre ein. Er konstruiert eine neue Form des Kondensators, die nach ihm benannte Tafel.

11) Antoine Laurent Lavoisier (1743—1794) stellt um 1775 zu Paris das Gesetz von der Erhaltung der Materie bei chemischen Vorgängen auf.

12) Aloisio (Luigi) Galvani (1737—1798), Arzt in Bologna, entdeckt 1780 Zuckungen an Froschschenkelpräparaten. Die Aufklärung hierfür erbringt Volta, der nachweist, daß es sich um elektrische Erscheinungen handelt, daß zwei verschiedene Metalle dazu gehören, die einerseits metallisch miteinander verbunden sein müssen, während anderseits das Präparat die beiden Metalle berührt (vgl. unter 18: Voltaische Säule).

13) Die chemische Wirkung des Stromes wird 1800 von Carlisle und Nicholson erkannt.

14) Auch für die „galvanische Elektrizität" stellt sich 1803 die Möglichkeit der Fortleitung über weitere Strecken heraus.

15) Charles Augustin de Coulomb (1736—1806), Paris, stellt mit der von ihm 1785 erbauten Drehwage die Gesetzmäßigkeit der Kraftwirkung für elektrisch geladene Körper und für Magnetpole auf.

16) Samuel Thomas von Sömmering, München, macht 1809 den Vorschlag zu einem Telegraphen, der die elektrochemische Wirkung benutzen soll.

17) Dominique François Arago (1786—1853), Paris, entdeckt die magnetisierende Wirkung des Stromes.

18) Alessandro Graf Volta (1745—1827), Como, konstruiert 1799 in Pavia eine Säule, die im wesentlichen eine große Anzahl hintereinandergeschalteter galvanischer Elemente darstellt. Er ist der erste Beobachter des Lichtbogens.

19) Humphrey Davy (1778—1829), London, Physiker und Chemiker, zeigt 1810 einen stehenden Lichtbogen.

20) Hans Christian Oersted (1777—1851), dänischer Physiker, entdeckt 1819 zu Kopenhagen die Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom.

21) André-Marie Ampère (1775 Lyon — 1836 Marseille), Mathematiker und Physiker, Haupttätigkeit zu Paris, entdeckt die dynamische Wirkung des Stromes und behandelt ihre Gesetzmäßigkeiten.

22) Thomas Johann Seebeck (1770 Reval — 1831 Berlin), Arzt und Naturwissenschafter, entdeckt 1822 die Thermoelektrizität.

23) Georg Simon Ohm (1789 Erlangen — 1854), Physiker, Haupttätigkeit zu München, stellt das nach ihm benannte Gesetz auf in der Schrift: „Die galvanische Kette", Berlin 1827.

24) Daniell konstruiert 1836 das nach ihm benannte Element, das der Polarisation begegnet und dadurch konstanten Strom liefert.

25) Jean Baptiste Biot (1774—1862), Paris, stellt mit Savart zusammen das nach ihnen benannte Gesetz, betr. die Kraftwirkung zwischen Strom und Magnetpol auf.

26) Michael Faraday (1791—1867), London, Physiker und Chemiker, erklärt die Wirkungsweise des Kondensators auf Grund der Influenz, begründet die Meßtechnik der „Voltaischen Ströme", indem er ihre Stärke nach der chemischen Ausscheidung in der Zeiteinheit beurteilt (von ihm rührt die Bezeichnung Voltameter

her), erkennt die Gesetzmäßigkeit der Elektrolyse, entdeckt 1831 die Induktionselektrizität und stellt auf Grund von Eisenfeilbildern das magnetische Feld als ein System von Linien hin.

27) Johann Christian Poggendorff (1796—1877), Chemiker und Physiker, ist Urheber der nach ihm benannten Methode des Vergleichens von Spannungen, die für die Prüfung von Meßinstrumenten von Wichtigkeit ist (Kompensator). Zusammen mit Schweigger schafft er 1820 den Multiplikator.

28) Samuel Finley Morse (1791—1872), amerikanischer Maler, erhält in Deutschland die Kunde vom Elektromagnetismus und ersinnt 1832 den nach ihm benannten Schreibtelegraphen, der seit 1850 weiteste Verbreitung findet.

29) Jobart, französischer Ingenieur, macht 1838 den Vorschlag zur Glühlampe.

30) Karl August Steinheil (1801—1870), München, erbaut 1836 einen Drucktelegraphen und erkennt 1838 die Möglichkeit der Erdrückleitung (Nürnberg-Fürther Eisenbahn).

31) Julius Robert Mayer (1814—1878), Arzt in Heilbronn, stellt 1842 das Gesetz von der Erhaltung der Arbeit auf und begründet das Vorhandensein eines Wärmeäquivalentes für die mechanische Arbeit.

32) James Prescott Joule (1818—1889), englischer Privatgelehrter, ermittelt 1843 durch Versuche das mechanische Wärmeäquivalent und das nach ihm benannte Gesetz, betr. die durch den Strom entwickelte Wärmemenge.

33) Jean Bernard Léon Foucault (1819—1868), Paris, Physiker, arbeitet 1851—1855 über Magnetismus und erbaut einen Apparat zur Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme (Wirbelströme). Der von ihm herrührende Pendelversuch beweist die Erddrehung.

34) Karl Friedrich Gauß (1777—1855), Mathematiker in Göttingen, stellt ein absolutes Maßsystem für mechanische und magnetische Größen auf.

35) Wilhelm Eduard Weber (1804 Wittenberg — 1891), Physiker in Göttingen, 1843—1849 Leipzig, dehnt das von Gauß geschaffene absolute Maßsystem auf elektrische Größen aus (1840—1846); veröffentlicht sind diese Arbeiten in sieben Aufsätzen in den Abhandlungen der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften (1846—1878). Außer anderen Arbeiten erbringt er den Nachweis, daß es sich bei den bis dahin getrennt gehaltenen Gebieten der Reibungselektrizität, der Thermoelektrizität, des Galvanismus und des Faradayismus usw. um eine und dieselbe Elektrizität handelt.

Von Weber rührt der Nadeltelegraph (1833 mit Gauß), das Elektrodynamometer und unter anderem auch der Phonograph her.

36) Charles Wheatstone (1802—1875), Physiker in London, Urheber des nach ihm benannten Meßverfahrens von Widerständen. Er erbaut 1838 einen Zeigertelegraphen und 1867 einen Schnelltelegraphen.

37) Robert Wilhelm Bunsen (1811—1899), Chemiker in Göttingen, Marburg, Breslau und Heidelberg, schafft 1841 das nach ihm benannte Element. Für die Beleuchtungstechnik wichtig sind seine Lichtmessungen (Schatten- und Fettfleckphotometer), sowie mit Kirchhoff zusammen angestellte licht- und strahlungstheoretische Untersuchungen (Spektralanalyse).

38) Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887), Mathematiker und Physiker in Breslau, Heidelberg und Berlin, stellt die Gesetze der Stromverzweigungen auf und arbeitet mit Bunsen zusammen auf licht- und strahlungstheoretischem Gebiete (Spektralanalyse).

39) James Clerk Maxwell (1831 Edinburgh —1879 Cambridge), Erkenntnistheoretiker auf physikalischem Gebiet.

40) William Thomson (1824—1907), Physiker in Glasgow, 1892 zum Lord Kelvin ernannt, ist Urheber des Quadrantenelektrometers, der Stromwage, der umlaufenden Zähler und des Siphonrecorders.

41) Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821—1894), Physiker und Physiolog zu Berlin, Erfinder des Augenspiegels, wirkt bahnbrechend auf

energetischem Gebiet durch die Schrift „Über die Erhaltung der Kraft“, Berlin 1847, sowie durch Arbeiten auf dem Gebiet der Elektrolyse.

42) Heinrich Hertz (1857—1894), Schüler von Helmholtz, weist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkung nach durch Erzeugung stehender Wellen und beweist, daß diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieselbe ist, wie diejenige der Induktionswirkungen und des Lichtes.

43) Philipp Reis (1834—1874), Friedrichsdorf bei Homburg, ist Begründer des Telephonprinzipes durch Versuche vom Jahre 1861.

44) Alexis Graham Bell konstruiert 1876 das erste praktisch verwendbare Telephon in Brantford (Ontario).

45) David Eduard Hughes (1831 London — 1900 London), erbaut 1854 in Louisville (Kentucky) die ersten Exemplare seines Typendrucktelegraphen. 1878 erfindet er das Mikrophon.

46) Werner von Siemens (1816 — 1892) beschäftigt sich etwa seit 1847 mit der Telegraphentechnik zusammen mit J. G. Halske, nimmt 1849 Abschied aus einer militärischen Stellung und tritt selbst in die Firma ein. Er schafft den nach ihm benannten Zeigertelegraphen und seinen Typendrucker. 1856 folgt die Erfindung des Doppel-T-Ankers und 1866 die der dynamo-elektrischen Maschine. Durch eine große Schenkung fördert er die Gründung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

47) Gaston Planté (1835—1889). Nachdem durch einen deutschen Arzt namens Sinsteden im Jahre 1854 über ein Experiment, das als Grundversuch für die Akkumulatoren angesehen werden muß, veröffentlicht worden ist, erbaut Planté 1860 einen technisch verwendbaren Akkumulator.

48) Zénobe Théophile Gramme (1826 Belgien — 1901 Paris), zunächst Modelltischler, widmet sich dann der Physik, konstruiert den Ringanker und wendet auf ihn das von Siemens herrührende Dynamoprinzip an. Dadurch ist er Schöpfer der ersten brauchbaren Gleichstrommaschine mit vielteiligem Kollektor (Patent vom Jahre 1869).

Es hat sich später ergeben, daß der Physiker Luigi Pacinotti zu Pisa bereits 1860 einen Ring derselben Art gebaut und angewendet hatte, ohne daß die Wichtigkeit dieser Erfindung weiteren Kreisen bekannt wurde.

49) Pawel Nikolajewitsch Jablochkoff (1847—1894) zeitigt die nach ihm benannte Kerze, die 1877 in London an den Westenddocks ihren ersten Erfolg erlebt.

50) Friedrich von Hefner-Alteneck (1845—1904), Mitarbeiter an der Siemensschen Firma, erfindet 1872 den nach ihm benannten Trommelanker und 1879 die Differentialregelung von Bogenlampen; er ist Urheber der nach ihm benannten Einheit der Lichtstärke (1884), eines Riemendynamometers, der Innenpolmaschine und einer Wechselstrommaschine ohne Ankereisen (Scheibenanker).

51) Thomas Alva Edison, amerikanischer Erfinder, verbessert 1879 die Kohleglühlampe und macht sie populär.

52) Camillo Faure stellt 1881 einen Akkumulator nach seinem Verfahren her.

53) Johann Sigmund Schuckert (1846—1895), gründet 1873 zu Nürnberg eine mechanische Werkstatt. Er ist einer der ersten Erbauer von dynamo-elektrischen Maschinen und der Urheber der Parallelschaltung von Bogenlampen (Krizik).

54) Internationaler Elektrikerkongreß 1881 zu Paris. Es wird das Ampere, das Volt und das Ohm in Zusammenhang mit dem von Wilhelm Weber gegründeten absoluten Maßsystem angenommen.

55) Galileo Ferraris (1847—1897), Turin, veröffentlicht 1888 die Schrift: „Elektrodynamische Rotationen, hervorgerufen durch Wechselströme“, in der die Entstehung eines Drehfeldes durch zwei um 90° verschobene Wechselfelder erklärt wird. Spätere Veröffentlichungen behandeln den Dreiphasenstrom.

56) In der Ausstellung zu Frankfurt a. M. wird 1891 eine dreiphasige Kraftübertragungsanlage (Lauffen-Frankfurt mit Transformatoren auf beiden Seiten und Hochspannungsleitung) gezeigt.

Schlagwortverzeichnis.

(Eigennamen haben besonderes Register.)

Verzeichnis der im Lehrbuch vorkommenden Eigennamen und Firmen.





